

# Empfehlungen für geschweißte KK-Knoten im Straßenbrückenbau

Berichte der  
Bundesanstalt für Straßenwesen

Brücken- und Ingenieurbau Heft B 71

The logo consists of the word "bast" in a bold, lowercase, green sans-serif font. The letters are slightly shadowed, giving it a 3D appearance. The logo is positioned in the bottom right corner of the page.



# Empfehlungen für geschweißte KK-Knoten im Straßenbrückenbau

von

Ulrike Kuhlmann  
Mathias Euler

Institut für Konstruktion und Entwurf  
Stahl-, Holz- und Verbundbau  
Universität Stuttgart

**Berichte der  
Bundesanstalt für Straßenwesen**

Brücken- und Ingenieurbau Heft B 71

**bast**

Die Bundesanstalt für Straßenwesen veröffentlicht ihre Arbeits- und Forschungsergebnisse in der Schriftenreihe **Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen**. Die Reihe besteht aus folgenden Unterreihen:

A - Allgemeines  
B - Brücken- und Ingenieurbau  
F - Fahrzeugtechnik  
M - Mensch und Sicherheit  
S - Straßenbau  
V - Verkehrstechnik

Es wird darauf hingewiesen, dass die unter dem Namen der Verfasser veröffentlichten Berichte nicht in jedem Fall die Ansicht des Herausgebers wiedergeben.

Nachdruck und photomechanische Wiedergabe, auch auszugsweise, nur mit Genehmigung der Bundesanstalt für Straßenwesen, Stabsstelle Presse und Öffentlichkeitsarbeit.

Die Hefte der Schriftenreihe **Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen** können direkt beim Wirtschaftsverlag NW, Verlag für neue Wissenschaft GmbH, Bgm.-Smidt-Str. 74-76, D-27568 Bremerhaven, Telefon: (04 71) 9 45 44 - 0, bezogen werden.

Über die Forschungsergebnisse und ihre Veröffentlichungen wird in Kurzform im Informationsdienst **BAST-Info** berichtet. Dieser Dienst wird kostenlos abgegeben; Interessenten wenden sich bitte an die Bundesanstalt für Straßenwesen, Stabsstelle Presse und Öffentlichkeitsarbeit.

## Impressum

**Bericht zum Forschungsprojekt FE 15.413/2005/CRB:**  
Entwurfs-, Bemessungs- und Konstruktionsempfehlungen für geschweißte Hohlprofilverbindungen mit KK-Knoten im Straßenbrückenbau

### Projektbetreuung

Heinz Friedrich

### Herausgeber

Bundesanstalt für Straßenwesen  
Brüderstraße 53, D-51427 Bergisch Gladbach  
Telefon: (0 22 04) 43 - 0  
Telefax: (0 22 04) 43 - 674

### Redaktion

Stabsstelle Presse und Öffentlichkeitsarbeit

### Druck und Verlag

Wirtschaftsverlag NW  
Verlag für neue Wissenschaft GmbH  
Postfach 10 11 10, D-27511 Bremerhaven  
Telefon: (04 71) 9 45 44 - 0  
Telefax: (04 71) 9 45 44 77  
Email: [vertrieb@nw-verlag.de](mailto:vertrieb@nw-verlag.de)  
Internet: [www.nw-verlag.de](http://www.nw-verlag.de)

ISSN 0943-9293  
ISBN 978-3-86509-988-4

Bergisch Gladbach, März 2010

## Kurzfassung – Abstract

### Empfehlungen für geschweißte KK-Knoten im Straßenbrückenbau

In den letzten Jahren hat sich eine neue Konstruktionsform im Straßenbrückenbau etabliert. Hierbei handelt es sich um architektonisch anspruchsvolle, optisch ansprechende Verbundbrücken, die aus einem dreigurtigen Raumfachwerk mit Untergurt und Streben aus stählernen Rundhohlprofilen bestehen. Die Obergurte werden in die betonierte Fahrbahnplatte integriert.

Als besonders günstig hat sich bei der Gestaltung des Raumfachwerks die Anordnung der Streben in Form von fallenden und steigenden Diagonalen erwiesen. Der Untergurt bildet bei einer solchen Anordnung zusammen mit den Streben jeder Fachwerkwand die Form eines liegenden Ks. Der komplette Raumfachwerkknoten wird daher als räumlicher K-Knoten oder KK-Knoten bezeichnet.

Neuartig an der im Rahmen dieses Forschungsvorhabens untersuchten Bauweise ist die Ausführung der Fachwerkknoten als Schweißknoten. Das heißt, es wird die Möglichkeit des direkten Verschweißens der Streben auf dem Gurtprofil untersucht. Bisher sind in Deutschland Rohrknoten im Brückenbau ohne Knotenbleche nur als Gussknoten ausgeführt worden. Schweißknoten besitzen gegenüber der Gussknotenausführung drei wesentliche Vorteile. Zum Ersten werden durch die direkte Verschweißung die Gussformstücke eingespart, die aufgrund ihrer individuellen Herstellung einen wesentlichen Kostenfaktor darstellen. Zum Zweiten besitzt der Schweißknoten ein gutartiges Ermüdungsverhalten, da der Rissfortschritt nicht vom Inneren der Konstruktion ausgeht, sondern an der Außenseite beginnt. Damit besteht die Möglichkeit einer frühzeitigen Detektion bei einer Brückenkontrolle und die Option für eine Ertüchtigung der ermüdungskritischen Tragwerksstellen durch eine Nachbehandlung. Zum Dritten wird der Planungs- und Ausführungsprozess gestrafft, da die relativ langen Vorlaufzeiten für die Gussknotenerstellung entfallen und mögliche Unterbrechungen bei Qualitätsmängeln an den Gussknoten, die durch den Neuguss entstehen, ausgeschlossen sind.

Aus der Sicht der Materialermüdung bedarf der Schweißknoten im Vergleich zum Gussknoten zusätzlicher Untersuchungen. Im Bereich der Gurt-Streben-Verbindung kommt es durch die plötzliche

Geometrieänderung zu hohen Spannungskonzentrationen. Zusätzlich erfährt der Ermüdungswiderstand in diesem Bereich aufgrund der metallurgischen Kerbe (Schweißkerbe) eine Reduzierung. Voruntersuchungen haben gezeigt, dass bei einer Schweißknotenausführung der Ermüdungsnachweis in der Regel für die Ausbildung des Raumfachwerks im Straßenbrückenbau bemessungsbestimmend wird. Aufgrund der komplizierten Geometrie kann die Bewertung des Ermüdungsverhaltens eines KK-Knotens nicht auf der Grundlage des Nennspannungskonzeptes erfolgen, sondern muss auf der Ebene der Strukturspannungen (Hot-Spot-Konzept) geführt werden. Eine praxisnahe Ermittlung der Strukturspannungen setzt das Vorhandensein tabellarisch oder graphisch aufbereiteter Spannungskonzentrationsfaktoren (SCF-Werte) voraus. Für den KK-Knoten im Off-Shore-Bereich, Kranbau und Hochbau stehen solche SCF-Werte zur Verfügung. Wegen der starken Abhängigkeit der SCF-Werte von den Verhältnissen der Durchmesser und Wanddicken der Gurt- und Strebenprofile ist eine einfache Übertragung der existierenden SCF-Werte auf die im Straßenbrückenbau besonderen Durchmesser-Wanddicken-Verhältnisse jedoch nicht möglich.

Im Rahmen dieses Forschungsvorhabens wird der KK-Knoten mit straßenbrückentypischer Geometrie einer ganzheitlichen Betrachtung aus der Sicht der Materialermüdung unterzogen. Für alle Phasen des Planungs- und Umsetzungsprozesses werden praxisnahe Empfehlungen gegeben. Die entwickelten Entwurfsempfehlungen fassen alle wesentlichen, entwurfsbestimmenden Grundsätze zusammen, die aus der unmittelbaren Abhängigkeit zwischen Stab- und Knotendimensionierung bei einem Fachwerk aus Hohlprofilen mit unversteiften KK-Knoten resultieren. Die Entwurfsempfehlungen stellen eine Synthese der besonders auch im europäischen Ausland gesammelten Erfahrungen an Pilot-Brückenvorhaben dar.

Die Bemessungsempfehlungen geben dem Tragwerksplaner ein wirkungsvolles Werkzeug bei der Führung des Ermüdungsnachweises an die Hand. Die im Rahmen dieses Forschungsvorhabens entwickelten SCF-Werte ermöglichen eine sichere und wirtschaftliche Ermittlung der Strukturspannungen. In den Ausführungsempfehlungen werden Hinweise zur Qualitätssicherung zusammengefasst, um die in den Bemessungsempfehlungen unterstellten Voraussetzungen am Bauwerk sicherzustellen. Durch alle Empfehlungen wird auch unter den anspruchsvollen Bedingungen im deutschen Straßenbrücken-

bau eine wirtschaftliche Realisierung von ästhetisch ansprechenden Verbundfachwerkbrücken aus Hohlprofilen mit geschweißten KK-Knoten möglich.

Die Arbeiten erfolgten in Abstimmung mit dem FOSTA-Projekt P 591 „Wirtschaftliches Bauen von Straßen- und Eisenbahnbrücken aus Stahlhohlprofilen“.

### **Recommendations for welded KK-joints in the construction of road bridges**

In the last two decades an innovative type of highway bridge design has been developed. Architecturally sophisticated spatial trusses made of circular hollow sections have become more and more popular in steel-concrete composite highway bridges. For this particular kind of composite bridge a tubular truss is arranged under the reinforced concrete slab serving as bridge deck.

Preferably, the tubular trusses consist of rising and falling (not crossing) braces running at an angle of 45 to 60 degrees (in longitudinal direction) toward a bottom chord tube. Subsequently, the bottom chord forms in longitudinal direction together with two adjacent braces a lying K. Due to the spatial arrangement of the braces a so-called multi-planar K-joint or KK-joint is created.

This research project is focused on innovative welded KK-joints in highway bridge design. Up to now the truss joints (if not reinforced by gusset plates) have been carried out as cast steel joints because of the complex geometry of the brace to chord connection. With the introduction of the CNC controlled pipe cut-off technology the question has arisen whether it is possible to fasten the braces directly to the chord tube by welding. The welded KK-joint has got some essential advantages over the cast steel joint. Firstly, the direct connection of the braces and the chord saves the cast steel node and, consequently, reduces the costs. Secondly, the fatigue behaviour of the welded joint may be considered quite positive since the fatigue cracks are initiated on the outside of the truss elements, especially the chord crown toe. Therefore, the cracks are well detectable through permanent non-destructive inspections. Furthermore, the fatigue resistance of the potential crack locations can be improved by post-weld treatment. Lastly, the design and the fabrication process are accelerated since interruptions caused by flawed cast steel nodes are eliminated.

The fatigue verification of a welded KK-joint requires additional considerations compared with the cast steel joint. The stress distribution of the chord and the braces indicates an essential stress concentration (hot spot stress) within the intersecting region. This stress-rising effect is caused by the sudden change in geometry (geometric notch). Additionally, the weld at this region diminishes the fatigue resistance (metallurgic notch). In a preliminary study it was shown that due to the fore-mentioned reasons the dimensioning of spatial tubular trusses is governed by the fatigue verification of the KK-joints for highway bridges. In order to verify a tubular truss against fatigue failure the S-N method cannot be performed anymore because of the complex geometry of the welded connections. The more sophisticated Hot-spot stress method has to be applied. The computation of the hot-spot stresses requires so-called SCF (stress concentration factors). For KK-joints in off shore, cranes etc. SCFs are given in tables. Due to the strong dependency of the SCFs on the ratios of tube diameters and wall thicknesses the existing SCFs cannot be transferred to highway bridge type geometries.

Within the research project the KK-joint in highway bridge design is considered in an integral view. Practically relevant recommendations are given for all stages of the planning and fabrication process. The recommendations for the design phase cover a wide range of design relevant principles being caused by the direct dependency of the truss member geometry and the design of unstiffened tubular joints. They are based on the experiences made by pilot bridge projects throughout Europe. The recommendations for the fatigue verification of KK-joints being developed within the research project are supposed to simplify the computations of hot-spot stresses. They are a powerful tool to get fast reliable hot-spot stresses without a great loss of accuracy.

Finally, the recommendations for the fabrication summarize a couple of quality management linked rules. They are supposed to ensure that the prerequisites of the fatigue verification are realized in the real structure. These recommendations allow the realisation of aesthetic composite tubular truss bridges with welded KK-joints that meet the demanding German highway bridge design requirements.

The research was performed in coordination with FOSTA-Project P 591: “Economic use of structural hollow sections for highway and railway bridges”.

## Inhalt

<b>1</b>	<b>Vorwort</b> .....	7	2.6.2	Bestehende Regelwerke .....	17
1.1	Vorteile von Rundhohlprofilen .....	7	2.6.3	Betrachtete Schweißnahtausbildung .....	18
1.2	Rund-Hohlprofilfachwerke im Brückenbau .....	7	2.7	Datenbank der ausgeführten Brücken .....	24
1.3	Vergleich von Gussknoten und Schweißknoten .....	8	2.7.1	Viadukt Lully (Schweiz) .....	24
1.4	Forschungsgegenstand .....	8	2.7.2	Dättwill (Schweiz) .....	24
1.5	Definitionen .....	9	2.7.3	Aarwangen (Schweiz) .....	24
1.5.1	Begriffe, Abkürzungen .....	9	2.7.4	Nesenbach (Deutschland) .....	24
1.5.2	Lateinische Formelzeichen .....	10	2.7.5	Korntal-Münchingen (Deutschland) ..	25
1.5.3	Griechische Formelzeichen .....	10	2.7.6	Porto (Portugal) .....	25
1.5.4	Indizes .....	11	2.7.7	St. Kilian (Deutschland) .....	25
<b>2</b>	<b>Entwurfsempfehlungen</b> .....	11	<b>3</b>	<b>Bemessungsempfehlungen</b> .....	25
2.1	Vorbemerkung .....	11	3.1	Vorbemerkung .....	25
2.2	Besonderheit der Planung .....	11	3.2	Nachweis .....	26
2.3	Redundanz .....	11	3.3	Widerstandsseite .....	26
2.4	Geometrieparameter .....	12	3.4	Einwirkung .....	27
2.5	Entwurfselemente .....	13	3.4.1	Vorbemerkung .....	27
2.5.1	Grundform .....	13	3.4.2	Strukturspannungen durch FEA .....	27
2.5.2	Durchmesser Verhältnis $\beta$ .....	13	3.4.3	Strukturspannungen durch SCF-Werte .....	27
2.5.3	Wanddicken Verhältnis $\tau$ .....	13	3.4.4	Konzept der lastfallabhängigen SCF-Werte .....	27
2.5.4	Gurtschlankheit $\gamma$ .....	14	3.4.5	Elementarlastfälle .....	27
2.5.5	Strebenneigung $\theta$ in Gurtlängsrichtung .....	14	3.4.6	Superposition .....	29
2.5.6	Neigung der Streben $\phi$ im Querschnitt .....	14	3.5	Zusammenstellung der SCF-Werte .....	29
2.5.7	Spaltmaß $g_L$ in Gurtlängsrichtung .....	14	3.5.1	Vorbemerkung .....	29
2.5.8	Exzentrizität $e$ in Gurtlängsrichtung .....	16	3.5.2	Auswertungsorte .....	29
2.5.9	Exzentrizität $e$ im Querschnitt .....	16	3.5.3	Mindestwerte der SCF .....	33
2.5.10	Spaltmaß $g_Q$ im Querschnitt .....	16	3.5.4	Anwendung der SCF-Diagramme .....	34
2.5.11	Zusammenfassung .....	17	3.6	Beispiel .....	133
2.6	Schweißnahtausbildung .....	17	3.6.1	Vorbemerkung .....	133
2.6.1	Nahtformen .....	17	3.6.2	Geometrie .....	133
			3.6.3	Belastung .....	133
			3.6.4	Bestimmung des Parameterbereiches .....	133
			3.6.5	Ermittlung des Mindest-Spaltmaßes .....	133

3.6.6	Ermittlung der Ausmitte	133	5.6.9	Zusammenfassung	155
3.6.7	Schnittgrößen und deren Zerlegung	133	5.7	SCF-Verläufe	155
3.6.8	Nennspannungen	135	5.7.1	Parameterstudie	155
3.6.9	Ermittlung der Strukturspannung	135	5.7.2	SCF-Verläufe	155
3.6.10	Übertragung auf Schwingbreiten	136	<b>6</b>	<b>Ausführungsempfehlungen</b>	<b>158</b>
<b>4</b>	<b>Hinweise zur Ermittlung der Nennspannungen</b>	<b>137</b>	6.1	Vorbemerkung	158
4.1	Einwirkungsseite	137	6.2	Anforderungen an den Schweiß- betrieb	158
4.2	Sekundärbiegung	137	6.2.1	Schweißerprüfung	158
4.2.1	Vorbemerkung	137	6.2.2	Zusätzliche Verfahrensprüfung	158
4.2.2	Sekundärbiegung über Momenten- beiwerte	137	6.3	Bewertungsgruppe	159
4.2.3	Explizite Erfassung der Sekundär- biegung	140	6.4	Schweißkantenvorbereitung	159
4.3	Zusammenfassung	140	6.4.1	Allgemeines	159
<b>5</b>	<b>Hintergründe zur numerischen Ermittlung der SCF-Werte</b>	<b>140</b>	6.4.2	Nacharbeiten des Zuschnitts	159
5.1	Vorbemerkung	140	6.4.3	Schweißbadsicherung	159
5.2	Modellierung	140	6.4.4	Schweißnahtübergänge	159
5.2.1	Verschneidungskurven	141	6.4.5	Heftungen	160
5.2.2	Extrapolationspfade	141	6.5	Materialanforderungen	160
5.2.3	Schweißnahtmodellierung	144	6.5.1	Prüfzeugnisse	160
5.2.4	Elementtyp	144	6.5.2	Stahlgütewahl mit Blick auf die Bruchzähigkeit	160
5.2.5	Diskretisierung	145	6.5.3	Stahlgütewahl mit Blick auf beson- dere Anforderungen in Blechdicken- richtung	160
5.3	Materialverhalten	145	6.6	Fertigungsbegleitende Qualitäts- prüfung	161
5.4	Belastung	145	6.6.1	Allgemeines	161
5.5	Spannungsermittlung	145	6.6.2	Fertigungskontrollen	161
5.6	Verifizierung des FE-Modells	146	6.6.3	Zerstörungsfreie Prüfungen	161
5.6.1	Vorbemerkung	146	<b>7</b>	<b>Ausblick</b>	<b>161</b>
5.6.2	Vergleichsmöglichkeiten	146	<b>8</b>	<b>Literatur</b>	<b>161</b>
5.6.3	Grenzen der Vergleichbarkeit	146	8.1	Normen	161
5.6.4	Gurtnormalkraft	148	8.2	Bücher, Beiträge etc.	163
5.6.5	Gurtbiegung in der Ebene (ipb)	150	8.3	Sonstige Veröffentlichungen	165
5.6.6	Strebennormalkraft	150			
5.6.7	Strebenbiegung in der Ebene (ipb)	153			
5.6.8	Strebenbiegung aus der Ebene (opb)	153			



# 1 Vorwort

## 1.1 Vorteile von Rundhohlprofilen

Rundhohlprofile zeichnen sich gegenüber offenen Querschnitten durch eine Reihe von Vorteilen aus. Zu diesen Vorteilen zählen allgemein deren richtungsunabhängige Widerstands- und Steifigkeitswerte, ihre geringe Knickgefährdung sowie ihr hoher Torsionswiderstand. Des Weiteren bedingt das günstige Verhältnis von Querschnittsfläche und Oberfläche einen kostenreduzierenden, weil sparsamen Einsatz von Korrosionsschutz. Ferner besitzen Rundhohlprofile in steifenlosen Fachwerken eine Reihe von gestalterischen Vorzügen aufgrund ihres organischen und abgerundeten Erscheinungsbildes. Auch zählen steifenlose Rundhohlprofilkonstruktionen zu den so genannten „sauberen Konstruktionen“ aufgrund der geringen Schmutzablagerungen im Bereich der steifenlosen Knotenpunkte.

## 1.2 Rund-Hohlprofilfachwerke im Brückenbau

Fachwerkstrukturen aus Hohlprofilen werden im Brückenbau im zunehmenden Maße aufgrund ihres transparenten und ästhetisch ansprechenden Erscheinungsbildes gegenüber den Vollwandkonstruktionen bevorzugt, vgl. [DAUNER 1998, SCHLAICH, SCHOBER 1999B, SEIFRIED, ANGELMAIER, et al. 1999, BERNHARDT, MOHR et al. 2003, DENZER, WEYER, DIECKMANN 2006] etc. Hierbei kommt der Querschnittsform der dreigurtigen Fachwerkverbundbrücke mit steigenden und fallenden Diagonalen und einer aufliegenden Betonfahrbahnplatte als Obergurt eine hervorragende Bedeutung zu, die sich bereits bei im europäischen Ausland umgesetzten Brückenvorhaben sehr gut bewährt hat, vgl. Bild 1-1.

Bei dieser Brückenbauweise bilden jeweils zwei Streben einer Fachwerkwand zusammen mit dem Untergurt ein liegendes K, Bild 1-2 a, b. Räumlich treffen auf dem Untergurt in jedem Fachwerkknoten vier Streben aufeinander, Bild 1-1. Daher bezeichnet man diese Fachwerkknoten als räumliche K-Knoten oder KK-Knoten.

Die Ausbildung der Knotenpunkte ist für die Wirtschaftlichkeit einer Fachwerkstruktur aus Rundhohlprofilen von entscheidender Bedeutung. Grundsätzlich können zwei versteifungsfreie Aus-

führungsvarianten (ohne Knotenbleche) unterschieden werden: der Schweißknoten und der Gussknoten, siehe Bild 1-3. Beim Schweißknoten werden die Streben direkt auf das durchlaufende Gurtprofil geschweißt. Im Gegensatz dazu kommt beim Gussknoten ein eigens angefertigtes Stahlgussteil zum Einsatz, an das alle Tragglieder über Stumpfstoße angeschlossen werden. Da die Stahlgussteile für jede Brücke individuell gefertigt werden müs-

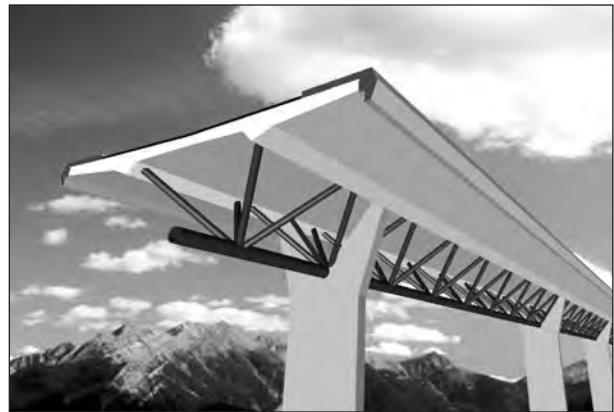


Bild 1-1: Schematischer Aufbau einer dreigurtigen Fachwerkverbundbrücke

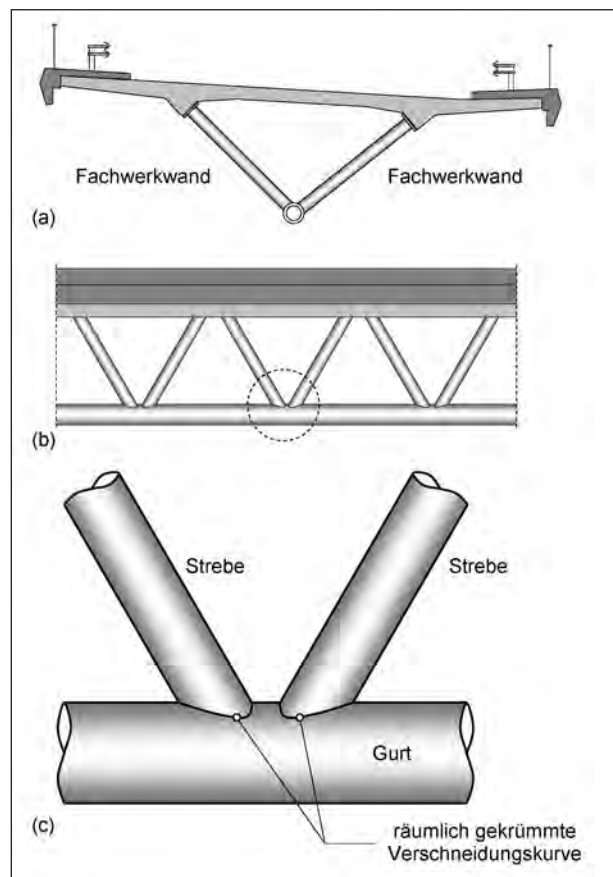
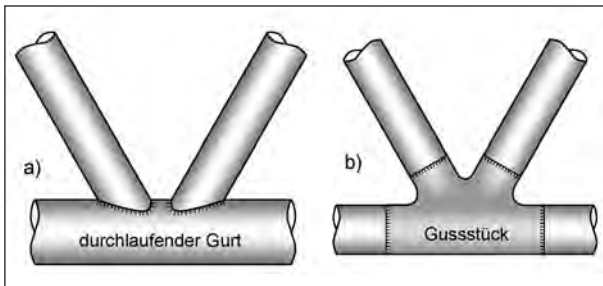


Bild 1-2: Fachwerkverbundbrücke: (a) Querschnitt, (b) Seitenansicht, (c) geschweißter K-Knoten



**Bild 1-3:** Ausbildung der Fachwerkknoten: a) Schweißknoten, b) Gussknoten

sen, bilden sie einen nicht unerheblichen Anteil an den Baukosten.

Bisher sind in Deutschland abgesehen von Ausführungen mit konventionellen, durch Knotenbleche versteiften Rohrknöten nur Brücken mit Stahlgussknöten ausgeführt worden, siehe bspw. [SCHLAICH, SCHÖBER 1999C, HERION 2007].

Ein wesentlicher Grund hierfür sind die komplizierten geometrischen Verschneidungen beim Zusammentreffen der einzelnen Fachwerkelemente (siehe Bild 1-2 c). Durch die Weiterentwicklung des CNC-gesteuerten Rohrzuschnitts ist der Stahlbau heute in der Lage, diese Verschneidungsbereiche zu beherrschen. Damit stellt sich die Frage, ob geschweißte Fachwerkknoten als kostengünstige Alternative zu den Gussknöten im Straßenbrückenbau zum Einsatz kommen können. Erste Sonderangebote durch Stahlbauunternehmen bei Brückenausschreibungen zeigen das Interesse.

### 1.3 Vergleich von Gussknöten und Schweißknöten

Es kann nicht grundsätzlich gesagt werden, dass Guss- und Schweißknöten konkurrierende Bauweisen sind. Beide Knötentypen haben ihre speziellen Anwendungsbereiche.

Der Gussknoten zeichnet sich durch eine hohe Flexibilität in der Formgebung aus. Diese kommt vor allem dann zum Tragen, wenn eine Vielzahl von Traggliedern an einen Knoten anschließen. Die auszuführenden Schweißarbeiten sind im Gegensatz zum Schweißknoten einfacher, da alle Anschlüsse reine Stumpfstoße darstellen. Auf der anderen Seite ist jedoch die Anzahl der im ermüdungskritischen, zugbeanspruchten Haupttragelement zu schweißenden Stoße größer. Zusätzlich ist die Herstellung der Stahlgussteile zeit- und kostenintensiv.

Schweißknöten besitzen gegenüber der Gussknötenausführung drei wesentliche Vorteile. Zum Ersten werden durch die direkte Verschweißung die Gussformstücke eingespart, die aufgrund ihrer individuellen Herstellung einen wesentlichen Kostenfaktor darstellen. Zum Zweiten besitzt der Schweißknoten ein gutartiges Ermüdungsverhalten, da der Rissfortschritt nicht vom Inneren der Konstruktion ausgeht, sondern an der Außenseite beginnt. Damit besteht die Möglichkeit einer frühzeitigen Detektion bei einer Brückenkontrolle und die Option für eine Ertüchtigung der ermüdungskritischen Tragwerksstellen durch eine Nachbehandlung. Zum Dritten wird der Planungs- und Ausführungsprozess gestrafft, da die relativ langen Vorlaufzeiten für die Gussknötenherstellung entfallen und mögliche Unterbrechungen bei Qualitätsmängeln an den Gussknöten, die durch den Neuguss entstehen, ausgeschlossen sind. Nachteilig sind beim Schweißknoten, dass die Schweißarbeiten eine hohe Befähigung des fertigenden Unternehmens voraussetzen. Nicht nur dass über den Nahtverlauf sich die Nahtform und die Schweißposition ändern, sondern auch die hohe Ermüdungsbeanspruchung der Schweißnähte erfordert eine hohe Fertigungsqualität. Im Gegensatz zum Gussknoten, bei dem durch eine günstige Ausformung des Gussteils die Schweißnähte aus dem strukturellen Störbereich des Fachwerkknotens herausgeführt werden können, liegen die Schweißnähte beim Schweißknoten im Bereich der höchsten Ermüdungsbeanspruchung.

### 1.4 Forschungsgegenstand

Durch bereits im Vorfeld des Forschungsvorhabens durchgeführte numerische Untersuchungen an KK-Knoten stellte sich heraus, dass im Straßenbrückenbau die Ermüdungsfestigkeit von geschweißten KK-Knoten gegenüber deren statischer Tragfähigkeit bemessungsentscheidend wird [KUHLMANN et al. 2002, STUBA 2001].

Auf der Grundlage der existierenden, in Deutschland bisher aber noch nicht eingeführten Bemessungsregeln lassen sich KK-Knoten unter zyklischer Belastung auslegen [ZHAO et al. 2002]. Allerdings beschränken sich diese Bemessungsregeln auf den Geometriebereich des Hoch- und Kranbaus. Bisher existiert nur ein Bemessungsvorschlag für K-Knoten von [SCHUMACHER 2003] für im Straßenbrückenbau übliche Knotengeometrien. [SCHUMACHER 2003] entwickelte Bemessungs-

hilfen für den Ermüdungsnachweis auf der Grundlage der Strukturspannungsmethode. Hierzu führte sie umfangreiche numerische Studien durch, die durch eine größere Versuchsreihe validiert wurden. Für den KK-Knoten mit brückenbautypischen Abmessungen existieren derzeit weder experimentelle noch numerische Untersuchungen in Form von Parameterstudien.

Das Forschungsvorhaben konzentrierte sich daher auf die Entwicklung von Bemessungsempfehlungen für KK-Knoten unter besonderer Berücksichtigung des Ermüdungsaspektes. Neben den Bemessungsempfehlungen wurden zusätzlich Entwurfs- und Ausführungsempfehlungen formuliert. Sie haben das Ziel, dem planenden Ingenieur sichere und praxismgerechte Hilfsmittel zur Bemessung und Gestaltung von im Straßenbrückenbau einsetzbaren KK-Knoten an die Hand zu geben. Die hier zusammengestellten Empfehlungen zum Entwurf und zur Ausführung basieren im Wesentlichen auf den Erfahrungen der bisher ausgeführten Straßenbrücken mit geschweißten KK-Knoten im europäischen Ausland.

Da die älteste bekannte Brücke im Ausland erst knapp 20 Jahre alt ist, spiegeln die Empfehlungen nur den heutigen Wissensstand wider und sollten über die nächsten Jahre und Jahrzehnte entsprechend dem Erfahrungszugewinn angepasst werden.

## 1.5 Definitionen

### 1.5.1 Begriffe, Abkürzungen

Folgende Begriffe und Abkürzungen werden in diesem Bericht verwendet:

**AWS.** American Welding Society, amerikanisches Normungsinstitut.

**Bezugsstrebe** ist die Strebe, auf die sich der SCF-Wert bezieht.

**Carry-over-Effekt**, siehe auch Reference-Effekt. Hierunter versteht man die Beeinflussung eines SCF-Werts, die von Lasten ausgeht, die nicht auf die Bezugsstrebe einwirken.

**Dihedral-Winkel**  $\psi$ . Dieser Winkel besitzt nur bei der Schweißnahtausbildung gemäß AWS eine Bedeutung. Siehe Bild 2-11 a.

**Extrapolation.** Verfahren zur Ermittlung der Strukturspannungen am Schweißnahtübergang. Als Aus-

gangspunkt der Extrapolation dient der Spannungsverlauf aus dem von der Schweißnahtkerbe unbeeinflussten Bereich.

**Kronenferse**, Rückseite der Verschneidungslinie von Gurt und Strebe. Siehe Bild 1-5.

**Geometrische Spannungen.** Synonym für Strukturspannungen.

**Hot-Spots** sind Orte großer Spannungskonzentrationen, vorwiegend im Verschneidungsbereich von Strebe und Gurt.

**Hot-Spot-Spannungen.** Synonym für Strukturspannungen.

**Kronenspitze**, Vorderseite der Verschneidungslinie von Gurt und Strebe. Siehe Bild 1-5.

**Maßstabseffekt.** Im Rahmen dieses Berichtes versteht man unter Maßstabseffekt die Abnahme des Ermüdungswiderstandes mit zunehmender Wanddicke.

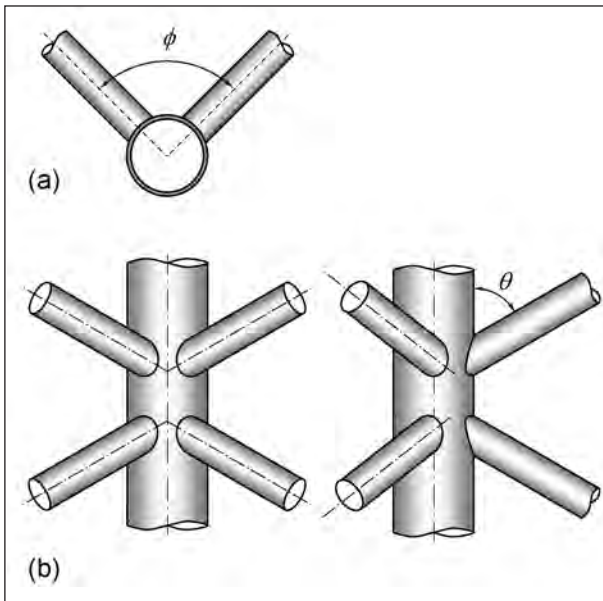
**Nennspannungen**, auch nominelle Spannungen, sind die durch die Ingenieurmechanik ermittelten Spannungen. Sie berücksichtigen keine sekundären Spannungsanteile infolge einer Lasteinleitung oder einer Spannungskonzentration im Bereich struktureller Störungsstellen wie Schweißnähten.

**Primärspannungen** (engl. primary stresses) werden in diesem Bericht als die Spannungen senkrecht zum Schweißnahtübergang definiert. Allgemeiner formuliert sind sie die Spannungen, die normal zur potenziellen Ermüdungsrisssebene verlaufen. Im Fall des KK-Knotens ist der Schweißnahtübergang der potenzielle Rissausgangsort. Die Primärspannungen müssen nicht mit den Hauptspannungen (engl. principal stresses) an der betrachteten Stelle identisch sein.

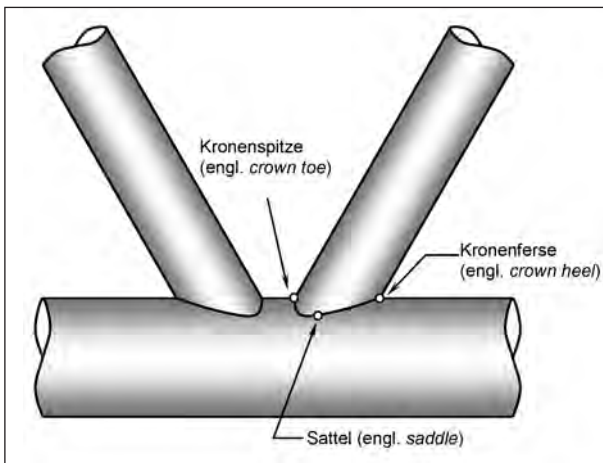
**Reference-Effekt.** Unter dem Reference-Effekt auf einen SCF-Wert versteht man die Wirkung von Lasten, die direkt auf die Bezugsstrebe wirken.

**Sattel**, auch Sattelbereich, Flanken der Verschneidungslinie von Gurt und Strebe, siehe Bild 1-5. Beim KK-Knoten wird zwischen innerem und äußerem Sattel unterschieden, siehe Bild 3-8.

**SCF**, Abkürzung für Spannungskonzentrationsfaktor (engl. stress concentration factor). Dieser Faktor stellt eine Beziehung zwischen den Nennspannungen und den Strukturspannungen her.



**Bild 1-4:** Definition der Strebenwinkel: (a)  $\phi$  im Querschnitt, (b)  $\theta$  in Gurtlängsrichtung



**Bild 1-5:** Orte im Bereich der Gurt-Streben-Verschneidung

**Strebenneigung  $\phi$  im Querschnitt.** Diese wird über den ebenen Winkel zwischen den Streben im Querschnitt definiert, siehe Bild 1-4 (a).

**Strebenneigung  $\theta$  in Gurtlängsrichtung.** Diese wird über den ebenen Winkel zwischen Strebe und Gurtrohr definiert, siehe Bild 1-4 (b).

**Strukturspannungen,** auch geometrische Spannungen oder Hot-Spot-Spannungen, sind rechnerische Spannungen. Im Bereich der Verschneidung von Gurt und Strebe bewirkt die Schweißnaht einen Spannungsanstieg. Zum einen wird dieser Anstieg infolge der Versteifung des Fachwerkknotens durch die Schweißnaht bedingt (globaler Effekt). Zum anderen führen die Form der Schweißnaht und deren Übergänge zu örtlichen Spannungsspitzen (lokaler

Effekt). Die Strukturspannungen berücksichtigen im Gegensatz zu den Kerbspannungen nur den globalen Effekt. Aufgrund der Vernachlässigung der lokalen Effekte entsprechen die Strukturspannungen nicht den Spannungen, die eine FE-Berechnung mit modellierten Nähten am Schweißnahtübergang liefert. Die Strukturspannungen müssen über eine sog. Extrapolation aus den Spannungen im von der Naht ungestörten Bereich ermittelt werden.

### 1.5.2 Lateinische Formelzeichen

a	Kehlnahtdicke,
$d_0$	Durchmesser des Gurtprofils, in anderer Literatur auch D,
$d_1$	Durchmesser der Strebe, in anderer Literatur auch d,
e	Ausmitte,
F	Strebennormalkraft,
g	Spaltmaß,
L	Abstand vom Schweißnahtübergang,
M	Biegemoment,
m	Gleichgewichtsfaktor,
N	Gurtnormalkraft,
r	Radius,
$t_0$	Wanddicke des Gurtprofils, in anderer Literatur auch T,
$t_1$	Wanddicke der Strebe, in anderer Literatur auch t,
$w_{\text{Gurt}}$	Schenkelmaß der Schweißnaht = Schweißnahtspur auf dem Gurt,
x, y, z	Koordinaten im kartesischen Koordinatensystem.

### 1.5.3 Griechische Formelzeichen

$\beta$	Durchmesserverhältnis,
$\gamma$	Gurtschlankheit,
$\delta$	Umlaufwinkel,
$\phi$	Strebenneigung im Querschnitt,
$\sigma_{\text{HS}}$	Strukturspannung, auch Hot-Spot-Spannung genannt,
$\sigma_{\text{nom}}$	Nennspannung,

$\tau$	Wanddickenverhältnis,
$\theta$	Strebenneigung in Gurtlängsrichtung,
$\psi$	Dihedralwinkel.

#### 1.5.4 Indizes

Die verwendeten Indizes orientieren sich an den üblichen Bezeichnungen in den bestehenden englischsprachigen Untersuchungen [ZHAO et al. 2002, WARDENIER et al. 1991, SCHUMACHER 2003] und Normen [EN 1993-1-8]. Um den Vergleich zu diesen Untersuchungen zu erleichtern, werden im Rahmen dieser Arbeit auch die englischen Indizes verwendet.

ax	Normalkraft (engl. axial force),
br	Strebe (engl. brace),
ch	Gurt (engl. chord),
ipb	Biegung in der Ebene (engl. in-plane bending),
nom	Nenn-, nominell,
L	in Längsrichtung,
opb	Biegung aus der Ebene (engl. out-of-plane bending),
Q	in Querrichtung,
ref	infolge Belastung der Bezugsstrebe.

## 2 Entwurfsempfehlungen

### 2.1 Vorbemerkung

In diesem Kapitel wird auf die Empfehlungen für die Tragwerksplanung und die konstruktive Durchbildung eines geschweißten Fachwerks im Straßenbrückenbau aus Rundhohlprofilen eingegangen. Damit sollen zum einen die Vorteile und Vorzüge dieser Konstruktionsweise voll genutzt werden können und zum anderen die Konstruktion der besonderen Ermüdungsbeanspruchung gerecht werden.

### 2.2 Besonderheit der Planung

Im Vergleich zu Fachwerkstrukturen mit offenen Querschnitten weist die Planung eines Fachwerks aus Hohlprofilen einige Besonderheiten auf. Der klassische Weg der Tragwerksplanung und der

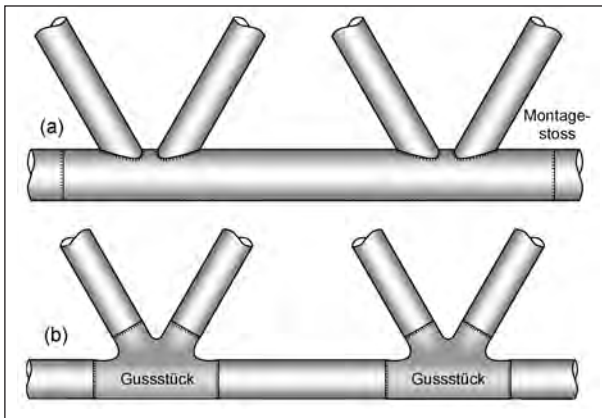
statischen Bemessung vollzieht sich normalerweise in zwei Schritten. In einem ersten Schritt werden die Abmessungen der einzelnen Fachwerkstäbe (z. B. Gurte, Streben etc.) entsprechend den auftretenden Stabschnittgrößen festgelegt. Anschließend, in einem zweiten Schritt, werden die Verbindungen und Anschlüsse der Fachwerkstäbe so dimensioniert, dass die auftretenden Schnittgrößen übertragen werden können. Die Trennung dieser Planungsschritte lässt sich bei versteifungsfreien Fachwerkknoten aus Hohlprofilen nicht mehr aufrechterhalten. Durch die unversteifte Ausbildung können die Fachwerkknoten gegenüber den Stäben für das Fachwerk bemessungsbestimmend werden. Da die Tragfähigkeit der unversteiften Fachwerkknoten wesentlich von der Geometrie der anschließenden Fachwerkstäbe abhängt, werden so indirekt die geometrischen Abmessungen der anschließenden Stäbe festgelegt. Demzufolge sollte die Knotendetaillierung also bereits am Entwurfsbeginn festgelegt werden. Andernfalls werden unter Umständen Knotenversteifungen erforderlich [PUTHLI 1998], die das Erscheinungsbild des Hohlprofilfachwerks nicht unerheblich beeinflussen.

### 2.3 Redundanz

Die Gurte eines Fachwerks bilden die Haupttragglieder dieser Konstruktion. Die Anzahl von Stößen im Gurtprofil (potenzielle Schwachstellen) sollte daher minimiert werden. Dieser Forderung kommt der Einsatz von Schweißknoten entgegen.

Im Gegensatz zum Gussknoten, bei dem das Gurtprofil vor und hinter jedem Knotenpunkt stumpf gestoßen werden muss, verringert sich beim Schweißknoten die Anzahl der Stöße und der zugehörigen Schweißnähte aufgrund des durchlaufenden Gurtprofils, vgl. Bild 2-1.

Bei den bisher realisierten Straßenbrücken (siehe Kapitel 2.7) bewegte sich der Knotenabstand in einem Bereich von ca. 5,00 m. Soweit es das Transportgewicht (Begrenzung durch Hebezeug) und die Lieferlängen der Hohlprofilhersteller zulassen, sollten daher mehrere Schweißknoten auf einem Rohrschuss realisiert werden. Für den im Straßenbrückenbau relevanten Durchmesserbereich, der sich schwerpunktmäßig zwischen 400 mm und 800 mm bei Wanddicken von 20 mm bis 80 mm bewegt, werden warmgefertigte Rohre bis zu einer Lieferlänge von 10,00 m angeboten, z. B. [VALLOUREC & MANNESMANN 1999].

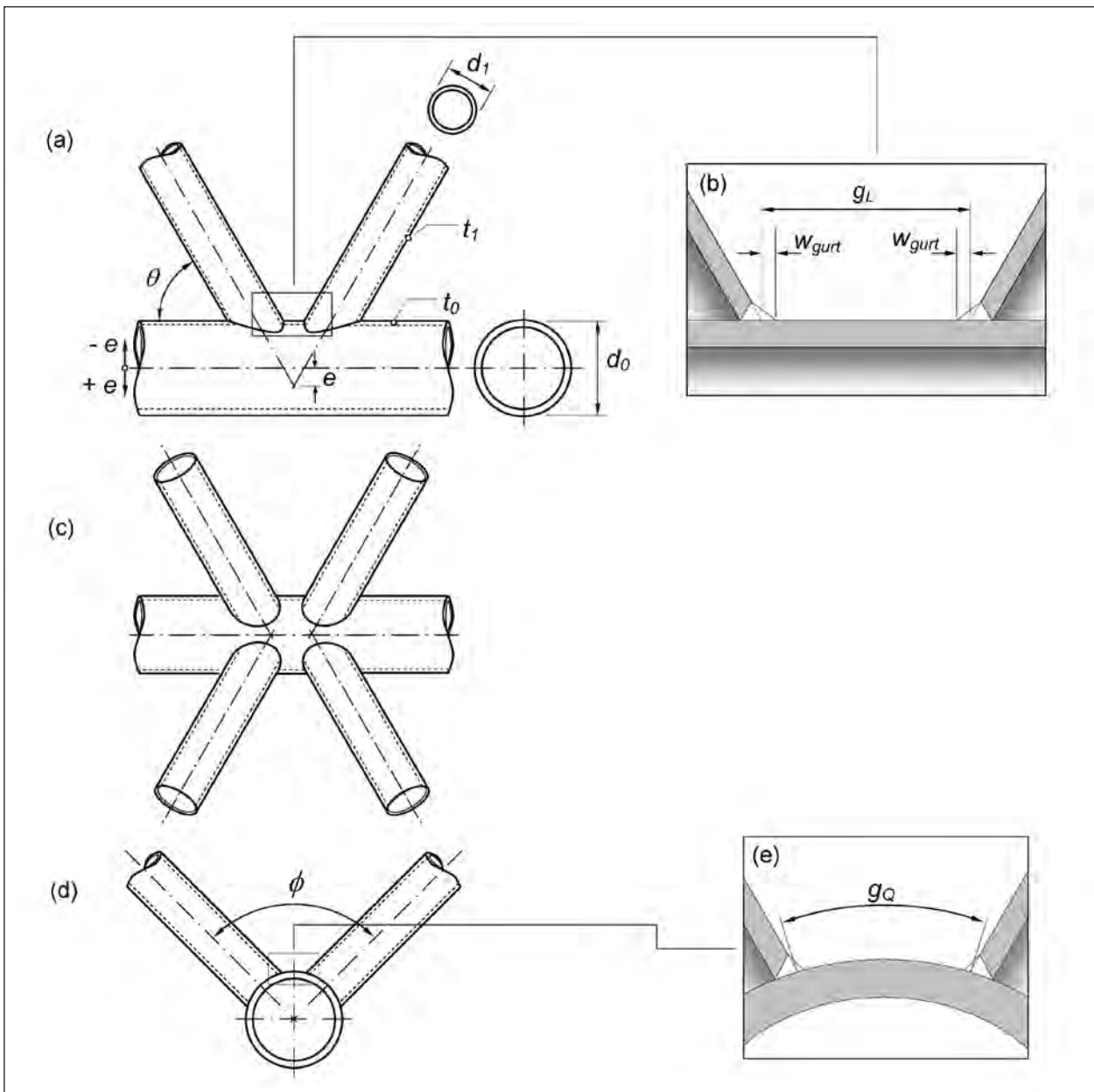


**Bild 2-1:** Anzahl der Stumpfstoße im Gurtprofil an einem Beispiel, (a) Schweißknoten, (b) Gussknoten

## 2.4 Geometrieparameter

Ein KK-Knoten kann durch folgende Geometrieparameter eindeutig beschrieben werden (siehe Bild 2-2):

- Strebe:  $d_1$  = Strebendurchmesser,  $t_1$  = Wanddicke der Strebe,
- Gurt:  $d_0$  = Gurtdurchmesser,  $t_0$  = Wanddicke des Gurts,
- Strebenneigung in Gurtlängsrichtung  $\theta$ ,
- Strebenneigung im Querschnitt  $\phi$ ,



**Bild 2-2:** Geometrieparameter des KK-Knotens: (a) Längsansicht, (b) Längsschnitt durch Gurtprofilscheitel, Spalt  $g_L$ , (c) Blick auf den KK-Knoten von oben, (d) Querschnitt, (e) Querschnitt durch Gurtprofilscheitel, Spalt  $g_Q$

- Spaltmaß in Gurtlängsrichtung  $g_L$ , das zu einer entsprechenden Exzentrizität  $e$  in dieser Richtung führt,
- Spaltmaß im Querschnitt  $g_Q$ .

## 2.5 Entwurfselemente

### 2.5.1 Grundform

Im Rahmen des Forschungsvorhabens wurden ausschließlich KK-Knoten mit Spalt und vier symmetrisch angeordneten, identischen Streben untersucht. Gemäß [EN 1090-2:2005], Bild E.4 sind Schweißknoten mit Spalt den überlappenden Schweißknoten vorzuziehen. Die Ausbildung eines Spalts ist eine wesentliche Voraussetzung für die Qualitätssicherung des KK-Knotens. Eine Überlappung der Streben führt teilweise zu verdeckten Schweißnahtbereichen, die sich während der Fertigung als auch bei den regelmäßig stattfindenden Brückeninspektionen während der Nutzung einer Sichtkontrolle aufgrund der beschränkten Zugänglichkeit entziehen.

Der im Folgenden vorgestellte Parameterbereich, der die Untersuchungsgrundlage des Forschungsvorhabens bildete, orientiert sich an in der Praxis bewährten Ausführungsbeispielen (siehe Kapitel 2.7). Die Autoren möchten ausdrücklich betonen, dass grundsätzlich auch andere Ausführungen (als die hier untersuchten) möglich sind. Die hier festgelegten Parameter haben sich jedoch alle durch die bisherige Erfahrung als realisierbar und daher sinnvoll erwiesen.

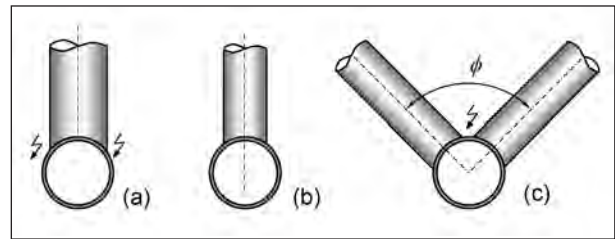
### 2.5.2 Durchmesser Verhältnis $\beta$

Der dimensionslose Wert  $\beta$  beschreibt das Verhältnis der Durchmesser von Gurt und Strebe.

$$\beta = \frac{d_1}{d_0} \quad (2.1)$$

Im Straßenbrückenbau ist die Bandbreite des  $\beta$ -Werts sowohl nach oben als auch nach unten begrenzt. Im Gegensatz zum Hoch- und Kranbau sind im Straßenbrückenbau Verhältnisse  $\beta < 0,45$  unüblich aufgrund der zu übertragenden hohen Lasten.

Nach oben ist der  $\beta$ -Wert durch die Schweißbarkeit und die Ausbildung eines Spalts begrenzt. Für K-Knoten sollte der  $\beta$ -Wert maximal 0,80 betragen, da andernfalls im Sattelbereich „schleifende“ Schweißnähte entstehen, Bild 2-3 (a). Die Literatur empfiehlt



**Bild 2-3:** Durchmesser Verhältnisse (a) Querschnitt eines K-Knotens mit  $\beta = 0,80$ , (b) Querschnitt eines K-Knotens  $\beta = 0,60$ , (c) Spaltforderung bei KK-Knoten

Brücken	$\beta = d_1/d_0$
Lully	0,53
Dättwill	0,53
Aarwangen	0,48
Nesenbachtal	0,60
Korntal-Münchingen	0,58
St. Kilian	0,49

**Tab. 2-1:** Bereits realisierte Durchmesser Verhältnisse

in der Regel  $\beta \leq 0,60$  [SCHUMACHER 2003, ZHAO et al. 2002], Bild 2-3 (b). Für die betrachteten KK-Knoten besteht zusätzlich noch die Nebenbedingung nach einem Spalt im Querschnitt. Die Größe des Spalts ist von der Strebenneigung im Querschnitt und dem  $\beta$ -Wert abhängig, Bild 2-3 (c). Für diese Abhängigkeit lässt sich folgender formelmäßiger Ausdruck angeben:

$$d_1 \leq d_0 \cdot \sin\left(\frac{\phi}{2}\right) \quad (2.2)$$

somit

$$\beta \leq \sin\left(\frac{\phi}{2}\right) \quad (2.3)$$

Die Tabelle 2-1 beinhaltet eine Zusammenstellung ausgeführter Durchmesser Verhältnisse.

Der Untersuchungsbereich wurde daher auf  $0,50 \leq \beta \leq 0,60$  begrenzt, siehe auch Kapitel 2.5.10.

### 2.5.3 Wanddicken Verhältnis $\tau$

Das Wanddicken Verhältnis  $\tau$  ist definiert als:

$$\tau = \frac{t_1}{t_0} \quad (2.4)$$

Bezug nehmend auf die Brückenprojekte, die bereits realisiert wurden (vergleiche Tabelle 2-2), wurde der Parameterbereich in diesem Forschungsvorhaben auf  $0,25 \leq \tau \leq 0,75$  begrenzt.

Brücken	$\tau = t_1/t_0$
Lully	0,44 ... 0,50
Dättwill	0,22 ... 0,50
Aarwangen	0,40 ... 0,78
Nesenbachtal	0,63 ... 0,75
Kortal-Münchingen	0,62 ... 0,69
St. Kilian	0,50 ... 1,00

Tab. 2-2: Bereits realisierte Wanddickenverhältnisse

### 2.5.4 Gurtschlankheit $\gamma$

Die Gurtschlankheit  $\gamma$  ist als Verhältnis von Gurtdurchmesser und doppelter Gurtwanddicke definiert:

$$\gamma = \frac{d_0}{2 \cdot t_0} \quad (2.5)$$

Im Straßenbrückenbau liegt die Gurtschlankheit in der Regel bei  $\gamma \leq 12$ . Damit grenzt sich der Straßenbrückenbau vom Hoch- und Kranbau ab, deren Gurtschlankheiten  $\gamma \geq 12$  betragen. Die geringeren Gurtschlankheiten im Brückenbau sind auch ein Grund, warum die Ergebnisse der bisherigen numerischen und experimentellen Untersuchungen zu KK-Knoten nicht ohne weiteres auf deren Geometrien übertragen werden können.

Die bisher realisierten Gurtschlankheiten bewegen sich in einer Bandbreite, die der Tabelle 2-3 entnommen werden kann. Dem Forschungsvorhaben wurde daher ein Parameterbereich von  $4 \leq \gamma \leq 12$  zugrunde gelegt.

### 2.5.5 Strebenneigung $\theta$ in Gurtlängsrichtung

Um die Größe der Stabkräfte und die Strebenanzahl zu begrenzen, ist für Fachwerkstrukturen i. Allg. eine Strebenneigung in Gurtlängsrichtung im Bereich von  $45^\circ \leq \theta \leq 60^\circ$  sinnvoll.

Die Tabelle 2-4 zeigt ausgeführte Strebenneigungen in Gurtlängsrichtung. Es wurden im Forschungsvorhaben daher sowohl  $45^\circ$  als auch  $60^\circ$  Strebenneigung in Gurtlängsrichtung untersucht.

### 2.5.6 Neigung der Streben $\phi$ im Querschnitt

Die Strebenneigung im Querschnitt hat einen wesentlichen Einfluss auf die Auslegung der Stahlbeton-Fahrbahnplatte. Steiler gestellte Streben bedingen größere Auskragungen, siehe Bild 2-4. Im Rahmen des Forschungsvorhaben wurde die Streben-

Bauvorhaben	$\gamma = d_0/(2 \cdot t_0)$
Lully	5,08 ... 10,16
Dättwill	5,08
Aarwangen	4,06 ... 5,64
Nesenbachtal	2,03 ... 10,13
Kortal-Münchingen	3,51 ... 5,07
St. Kilian	2,49 ... 12,20

Tab. 2-3: Bereits realisierte Gurtschlankheiten

Brücke	$\theta$
Lully	$60^\circ$
Dättwill	$60^\circ$
Aarwangen	$45^\circ$
Nesenbachtal	$46^\circ$
Kortal-Münchingen	$60^\circ$
St. Kilian	$55^\circ$

Tab. 2-4: Bereits realisierte Strebenneigungen in Gurtlängsrichtung

Brücke	$\phi$
Lully	$69^\circ$
Dättwill	$69^\circ$
Aarwangen	--
Nesenbachtal	$102^\circ$
Kortal-Münchingen	$90^\circ$
St. Kilian	$72^\circ$

Tab. 2-5: Bereits realisierte Strebenneigungen im Querschnitt

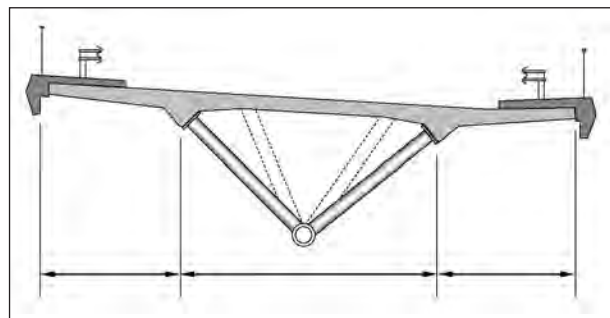


Bild 2-4: Abhängigkeit von Strebenneigung im Querschnitt und Spannweiten der Fahrbahnplatte in Querrichtung

neigung zur Begrenzung des Untersuchungsumfangs zu  $\phi = 90^\circ$  gewählt, siehe auch Tabelle 2-5.

### 2.5.7 Spaltmaß $g_L$ in Gurtlängsrichtung

Die Größe des Spaltmaßes  $g_L$  besitzt sowohl für die statische als auch dynamische Tragfähigkeit des



Knotens eine entscheidende Bedeutung. In der Regel führen kleinere Spaltmaße zu größeren Knotentragfähigkeiten. Das Spaltmaß bedingt eine definierte Exzentrizität  $e$  des Anschlusses der Streben an den Gurt, die zusätzliche Biegung bewirkt (vergleiche Bild 2-2 a). Die geometrische Abhängigkeit zwischen den Durchmessern von Gurt und Strebe, der Exzentrizität im Gurt und der Strebenneigung kann durch folgende Gleichungen ausgedrückt werden:

$$g_L = 2 \cdot \left( \frac{0,5 \cdot d_0 + e}{\tan \theta} \right) - \frac{d_1}{\sin \theta} \quad (2.6a)$$

$$e = \tan \theta \cdot \left( \frac{g_L}{2} + \frac{d_1}{2 \cdot \sin \theta} \right) - \frac{d_0}{2} \quad (2.6b)$$

### Anforderungen nach Eurocode 3

Mit Blick auf die Schweißbarkeit sollte das Spaltmaß eines nicht überlappenden K- bzw. KK-Knotens die folgende Mindestgröße besitzen [DIN EN 1993-1-8:2005-07]:

$$g_{L,\min} \geq t_1 + t_2 \quad (2.7)$$

wobei  $t_1$  und  $t_2$  die Wanddicken der beiden anschließenden Streben bezeichnen. Da die im Rahmen dieses Forschungsvorhabens untersuchten KK-Knoten nur Streben gleicher Wanddicke besitzen, gilt:

$$g_{L,\min} \geq t_1 + t_1 = 2 \cdot t_1 \quad (2.8)$$

Bei den Beziehungen (2.7) und (2.8) handelt es sich also nicht um Forderungen der Statik, sondern um Forderungen der Schweißbarkeit.

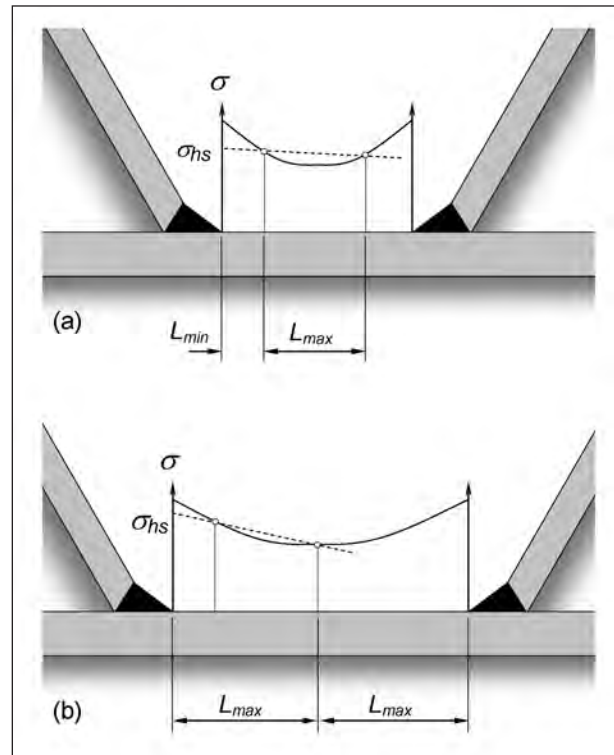
### Zusätzliche Anforderungen

In [SCHUMACHER 2003] werden folgende Anhaltswerte für das absolute Spaltmaß  $g_L$  für K-Knoten angegeben:

$$g_{L,\min} = \begin{cases} \geq 4 \cdot t_1 \\ \geq 1,6 \cdot t_0 + 2 \cdot w_{Gurt} \end{cases} \quad (2.9)$$

Die erste Bedingung in (2.9) soll die Schweißbarkeit des Fachwerkknotens sichern. Diese Forderung führt vor allem bei großen Strebenwanddicken zu großen Spaltmaßen, die beispielsweise weit über die Forderungen nach (2.7) hinausgehen.

Die zweite Bedingung in (2.9) soll sicherstellen, dass die Strukturspannungen für den Schweißnahtübergang ermittelt werden können.



**Bild 2-5:** Extrapolation der Spannungen an der Kronenspitze für den linken Schweißnahtübergang (a) bei zu kleiner Spaltgröße, (b) bei ausreichender Spaltgröße

In Bild 2-5 (a) wird exemplarisch dargestellt, welche Auswirkung eine zu geringe Spaltgröße auf die Ermittlung der Strukturspannungen besitzt. Aufgrund der Überlagerung der Einflussbereiche der benachbarten Schweißkerben besteht die Möglichkeit, dass die Extrapolation der Spannungen zum linken Schweißnahtübergang (siehe Kapitel 5) die Strukturspannungen unterschätzt. Bei der in Bild 2-5 (b) dargestellten Spaltgröße wurde dieser Umstand bei der Gestaltung des Knotens berücksichtigt. Die Extrapolationsbereiche überlagern sich nicht. Damit ergibt sich der folgende empfohlene Mindestwert für das Spaltmaß:

$$g_{L,\min} \geq 2 \cdot L_{max} + 2 \cdot w_{Gurt} \quad (2.10)$$

mit

$$L_{max} = 0,40 \cdot \sqrt[4]{\frac{d_0 \cdot t_0 \cdot d_1 \cdot t_1}{4}} = 0,20 \cdot d_0 \cdot \sqrt[4]{\frac{\beta \cdot \tau}{\gamma^2}}$$

als äußere Extrapolationsgrenze (siehe Kapitel 5.2.2) an der Kronenspitze und  $w_{Gurt}$  als Schweißnahtspur auf dem Gurt an der Kronenspitze nach Bild 2-6.

Eine Auswertung der Extrapolationsgrenze  $L_{max}$  in Abhängigkeit von  $\tau$  und  $\gamma$  zeigt Bild 2-7. Aufgrund der schmalen Bandbreite, in der der  $\beta$ -Wert im be-

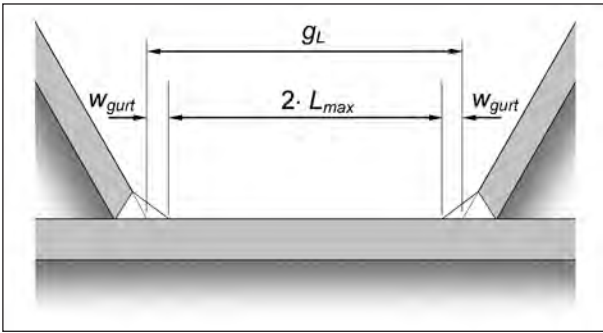


Bild 2-6: Minimal erforderliche Spaltgröße  $g_L$

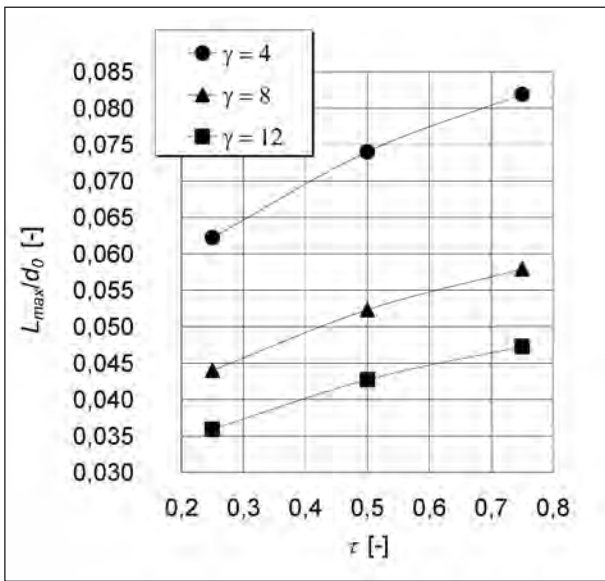


Bild 2-7: Abhängigkeit von Extrapolationsgrenze  $L_{max}$  und Gurtdurchmesser  $d_0$

trachteten Parameterbereich variiert, ist  $L_{max}$  weitestgehend von  $\beta$  unabhängig. Es wurde daher in diesem Forschungsprojekt folgendes Mindestspaltmaß zugrunde gelegt:

$$g_{L,min} = 2 \cdot L_{max} + 2 \cdot w_{Gurt} \quad (2.11)$$

mit  $L_{max}$  nach Bild 2-7. Eine Zusammenstellung von Spaltmaßen aus der Literatur kann Tabelle 2-6 entnommen werden.

In der Regel wird der Entwurf eines KK-Knotens auf ein minimales Spaltmaß abzielen. Um die Berechnungsempfehlungen praxisnah zu gestalten und um dem planenden Ingenieur einen gewissen gestalterischen Freiraum zu gewährleisten, wurden im Rahmen dieses Forschungsvorhabens die folgenden Spaltmaße untersucht:

Variante 1:  $g_L = g_{L,min} \quad (2.12)$

Variante 2:  $g_L = 2 \cdot g_{L,min} \quad (2.13)$

Quelle	$g_L$
Straßenbrücke Lully [DAUNER et al. 1998]	60 mm
Versuche an K-Knoten [ZIRN 1975]: $\beta = 0,5$ , $\tau = 0,5$ , $d_0 = 177,8$ mm, $\theta = 45^\circ$ , $\gamma = 8,9$	52 mm

Tab. 2-6: Spaltmaße  $g_L$  aus der Literatur

### 2.5.8 Exzentrizität e in Gurtlängsrichtung

Wie bereits in Kapitel 2.5.7 eingeführt, kann die in Gurtlängsrichtung vorhandene Exzentrizität infolge des Spaltmaßes  $g_L$  über die Beziehung (2.6 b) ermittelt werden. Da das Spaltmaß vom gestalterischen Standpunkt aus größere Bedeutung als die Exzentrizität besitzt, wurde die Exzentrizität zugunsten des Spaltmaßes nicht als freier Parameter innerhalb dieses Forschungsprojekts eingeführt.

### 2.5.9 Exzentrizität e im Querschnitt

Im Querschnitt wird von einem zentrischen Anschluss der Streben an das Gurtprofil ausgegangen, siehe Bild 2-2 (d).

### 2.5.10 Spaltmaß $g_Q$ im Querschnitt

Den Ausführungen in Kapitel 2.5.7 zum Spaltmaß  $g_L$  in Gurtlängsrichtung folgend besteht für das Spaltmaß  $g_Q$  im Querschnitt die gleiche Anforderung an die Schweißbarkeit gemäß Beziehung (2.7) [DUTTA 1999, S. 195].

Unter Einbeziehung der Extrapolationsgrenzen ergibt sich folgende Forderung:

$$g_{Q,min} = 2 \cdot L_{max} + 2 \cdot w_{Gurt} \geq 2 \cdot t_1 \quad (2.14)$$

mit

$$L_{max} = 0,09 \cdot \frac{d_0}{2} \text{ bzw. } 5^\circ$$

als äußere Extrapolationsgrenze am Sattel (siehe Kapitel 5.2.2) und  $w_{Gurt}$  als Schweißnahtspur auf dem Gurt am Sattel nach Bild 2-8.

Gemäß Beziehung (2.3) ergibt sich für die betrachtete Strebenneigung im Querschnitt von  $\phi = 90^\circ$  und das betrachtete maximale Durchmesser Verhältnis  $\beta \leq 0,60$  der in Bild 2-9 dargestellte Spalt im Querschnitt.

Ein Vergleich von Bild 2-8 und Bild 2-9 zeigt, dass für den untersuchten Parameterbereich sichergestellt ist, dass sich die Extrapolationsbereiche der Schweißnähte nicht überlagern.

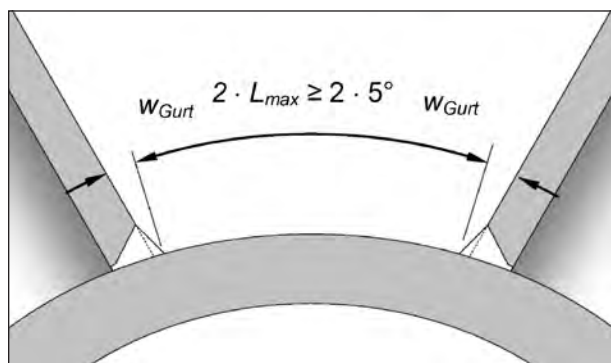


Bild 2-8: Erforderliche Spaltgröße  $g_Q$

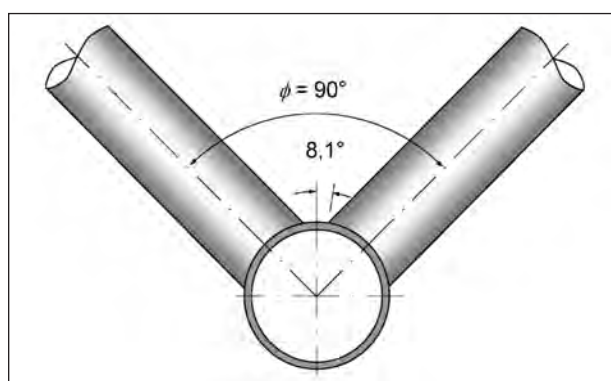


Bild 2-9: Größe des Spalts im Querschnitt bei  $\beta = 0,6$

Quelle	$g_Q$
Straßenbrücke Lully [DAUNER et al. 1998]	26 mm

Tab. 2-7: Bereits realisierte Spaltmaße  $g_Q$  aus der Literatur

Nach Ansicht des Arbeitskreises zu diesem Forschungsvorhaben und in Abstimmung mit der DVS AG A5 „Schweißen im Bauwesen“ sollte unabhängig von der Beziehung (2.14) ein absolutes Mindestmaß von 25 mm für den Spalt  $g_Q$  eingehalten werden, vergleiche auch Tabelle 2-7.

### 2.5.11 Zusammenfassung

Im Kapitel 2.5 wurde der untersuchte Parameterbereich der Entwurfs Elemente eines KK-Knotens vorgestellt. Für den Straßenbrückenbau konnte dabei der folgende Parameterbereich als relevant identifiziert werden:

$$0,50 \leq \beta \leq 0,60, \quad 4 \leq \gamma \leq 12, \quad 0,25 \leq \tau \leq 0,75,$$

$$\phi = 90^\circ, \quad 45^\circ \leq \theta \leq 60^\circ,$$

Spalt in Gurtlängsrichtung:  $g_L = g_{L,\min}$  bzw.  $2 \cdot g_{L,\min}$ ,

Spalt im Querschnitt:  $g_Q$  so gewählt, dass sich keine Ausmitte im Querschnitt ergibt.

## 2.6 Schweißnahtausbildung

### 2.6.1 Nahtformen

Die Festlegung der Schweißnahtform sollte sowohl mit Blick auf die Schweißbarkeit als auch auf die Wirtschaftlichkeit erfolgen. Eine gute Schweißbarkeit garantiert die Sicherheit und Zuverlässigkeit des KK-Knotens durch fehler- und kerbarme Schweißnähte. Die Begrenzung der Nahtvolumen auf das Erforderliche sichert die Wirtschaftlichkeit der Bauweise.

Im Rahmen dieses Forschungsvorhabens wurden zwei alternative Schweißnahtformen untersucht. Zum einen wurde eine umlaufende HV-Naht (Nahtform A) betrachtet, zum anderen eine an der Kronenspitze ausgeführte HV-Naht, die an der Kronenferse in eine Kehlnaht (Nahtform B) übergeht. Ein Beispiel für erstere Schweißnahtform ist das Viaduct von Lully, siehe Kapitel 2.7.1. Ebenfalls eine umlaufende HV-Naht wiesen die von [SCHUMACHER 2003] untersuchten Trägerversuche zu K-Knoten auf.

Im Kran- und Hochbau ist eine Kombination aus Kehlnaht und HV-Naht (Nahtform B) üblich, vergleiche [DUTTA 1999, DUTTA et al. 1998]. Die von [ROMEIJN 1994] durchgeführten Trägerversuche mit KK-Knoten besaßen eine solche Ausführung. Es zeigte sich, dass die Wurzellage der an der Kronenferse ausgeführten Kehlnaht nicht gefährdet ist. Der Riss ging in den Versuchen auch bei dieser Nahtform immer vom Schweißnahtübergang aus.

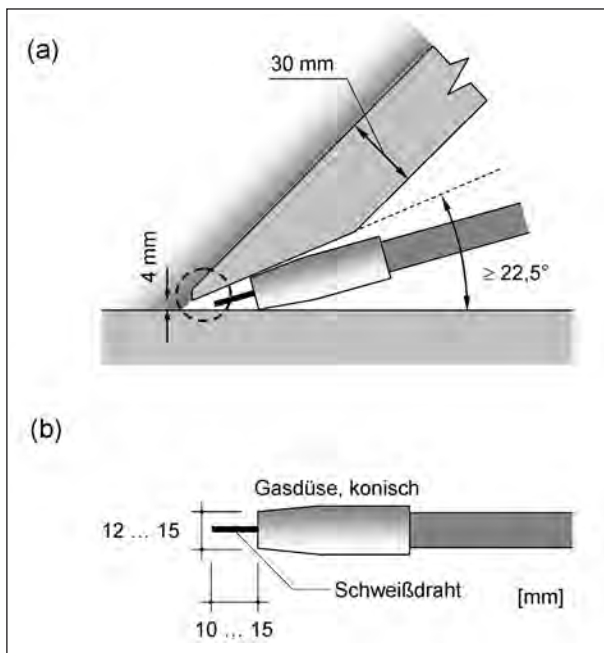
### 2.6.2 Bestehende Regelwerke

Nach den bestehenden Regelwerken ist die Ausbildung der beiden betrachteten Schweißnahtformen nicht eindeutig geregelt. Im Folgenden werden die Festlegungen der wichtigsten Normen vorgestellt und diskutiert.

### AWS

Die [AWS 2004] trifft für die umlaufende HV-Naht präzise Ausführungsbestimmungen, sowohl hinsichtlich der Schweißkantenvorbereitung als auch des Schweißnahtprofils.

Die Abbildung 3.10 in [AWS 2004] ist für dynamisch beanspruchte Hohlprofilknoten anzuwenden, vergleiche Bild 2-11 (b) und Bild 2-12 (b), rechte Seite. Für den im Brückenbau typischen Anwendungsbereich werden für die Kronenspitze das Detail A und für die Kronenferse das Detail C maßgebend.



**Bild 2-10:** Schweißbarkeit der Kronenferse: (a) Schweißkanten­vorbereitung an der Kronenferse für  $\theta = 45^\circ$  nach AWS, (b) kleinste Abmessungen der üblichen Gasdüse für MAG-Schweißen

In Bild 2-10 b wird an einem Beispiel einer Streben­neigung von  $45^\circ$  die Schweißnaht­vorbereitung für eine HV-Naht an der Kronenferse gemäß AWS (Bild 2-11) dargestellt. Der Anstellwinkel der Schweißkante muss hierbei in einer Bandbreite von  $22,5^\circ$  bis  $40^\circ$  liegen. Mit Blick auf das Schweißnaht­volumen sollte sich die Ausführung am Minimalwert orientieren. Es zeigt sich jedoch, dass dadurch zwei Fertigungsprobleme entstehen. Zum einen kann die Erfassung der Schweißnaht­wurzel nicht garantiert werden, zum anderen sind Bindefehler an der flach geneigten oberen Schweißnaht­flanke nicht ausgeschlossen.

### Germanischer Lloyd

Von [Germanische Lloyd IV: 2005] wird für alle Streben­neigungen gemäß [Germanische Lloyd IV: 2005], Bild 3.4.4 eine umlaufende HV-Naht als Standardausführung vorgesehen, wenn ein Gegen­schweißen der Wurzel nicht möglich ist. Andere Ausführungen bedürfen einer gesonderten Zulassung durch GL Wind.

### EN 1090-2

Dieses Regelwerk trifft grundsätzlich Regelungen für geschweißte Konstruktionen des Stahlbaus, unabhängig von der Art deren Beanspruchung. Im Gegensatz zu den amerikanischen AWS-Empfehlun-

gen, die eine Kombination von HV-Naht und Kehlnaht nicht ausdrücklich behandeln, sind im europäischen Regelwerk, in [EN 1090-2:2005], Anhang E, Bild E.2a und b solche kombinierten Nahtformen ausdrücklich erfasst. Allerdings sind die formulierten Ausführungsvorschläge zur Schweißnaht­profilierung nur qualitativer Natur. Die Empfehlungen zur Schweißkanten­vorbereitung sind im Gegensatz dazu zwar präziser, aber nicht so detailliert wie bei der AWS, vergleiche Bild 2-11 (b) und (c) sowie Bild 2-12 (b) und (c), jeweils linke Seite.

### DIN 18808

Diese deutsche Norm trifft grundsätzlich nur Festlegungen für vorwiegend ruhend beanspruchte Hohl­profilkonstruktionen. Die Festlegungen sind vor allem qualitativer Natur [DIN 18808], Bild 11. Es wird empfohlen, an der Kronenspitze bei Streben­neigungen  $\theta < 45^\circ$  eine HV-Naht und bei Streben­neigungen von  $\theta \geq 45^\circ$  eine Kehlnaht auszubilden. Für die Kronenferse werden für alle Streben­neigungen Kehlnähte zugelassen.

### ENV 1993-1-1

Aus statischer Sicht soll gemäß [DIN V ENV 1993-1-1:1992] grundsätzlich die Schweißnaht­beanspruchbarkeit höher sein als die Beanspruchbarkeit der anzuschließenden Strebe. Um ein frühzeitiges Schweißnaht­versagen unter statischen Einwirkungen zu vermeiden, sind nach [DIN V ENV 1993-1-1:1992] folgende Kehlnaht­dicken einzuhalten:

$$\begin{aligned} a &\geq 0,84 \cdot t_1 && \text{für S235} \\ a &\geq 0,87 \cdot t_1 && \text{für S275} \\ a &\geq 1,01 \cdot t_1 && \text{für S355} \end{aligned} \quad (2.15)$$

Eine entsprechende Regelung ist in [DIN EN 1993-1-1] nur noch qualitativ formuliert.

### 2.6.3 Betrachtete Schweißnahtausbildung

Auf der Grundlage der in Kapitel 2.6.2 vorgestellten Empfehlungen der internationalen Regelwerke wurde jeweils eine Schweißnahtausbildung für die betrachteten Nahtformen A und B festgelegt, die im Folgenden detailliert beschrieben werden. Die in Bild 2-15 bzw. Bild 2-16 dargestellte Schweißnahtausbildung für Streben­neigungen von  $45^\circ$  bzw.  $60^\circ$  wird vorgeschlagen und wurde bei der numerischen Untersuchung zu den KK-Knoten zugrunde gelegt.

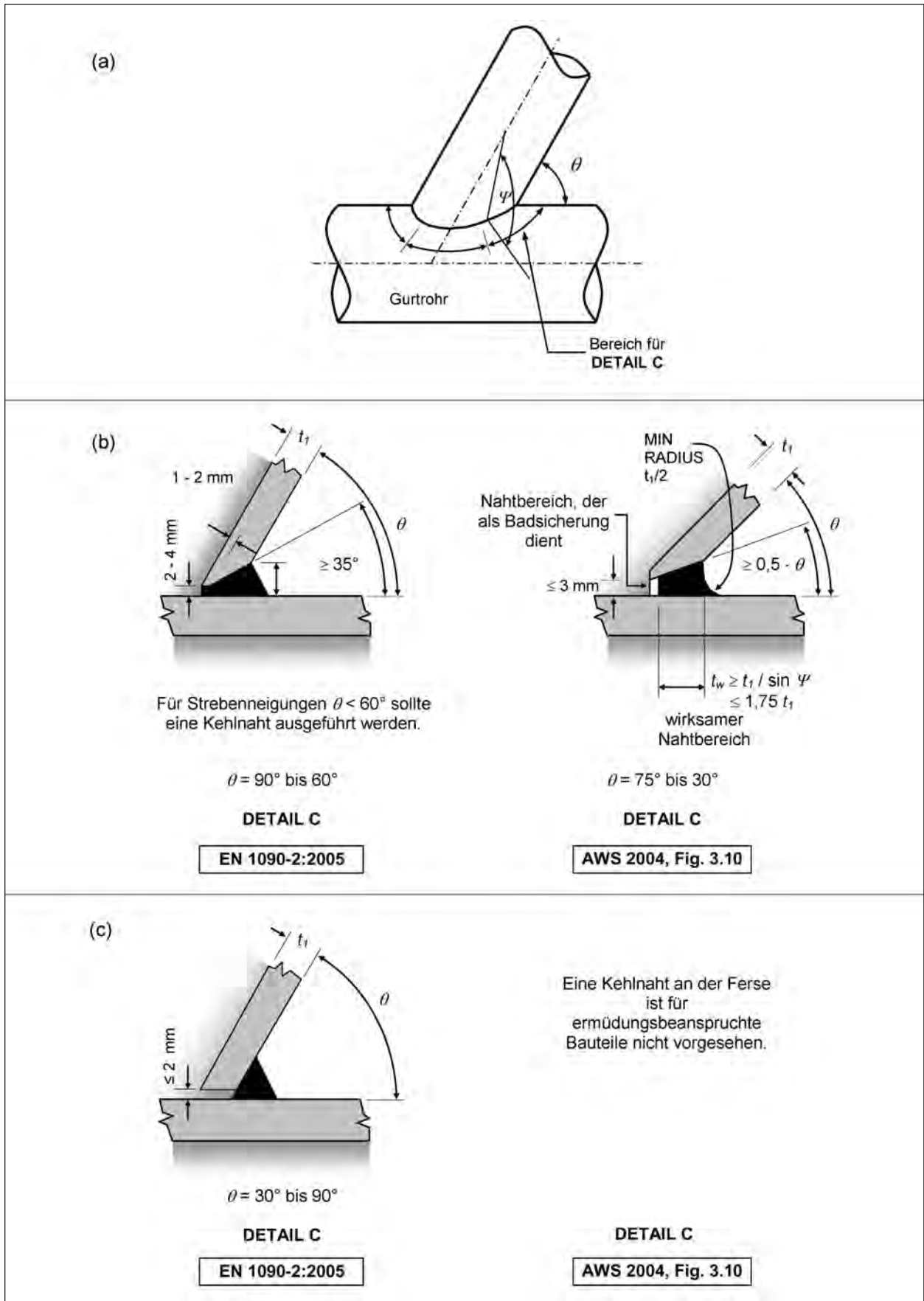


Bild 2-11: Empfohlene Nahtprofile nach EN 1090-2 und AWS, (a) Bereichsübersicht, (b) Kronenferse mit HV-Naht, (c) Kronenferse mit Kehlnaht

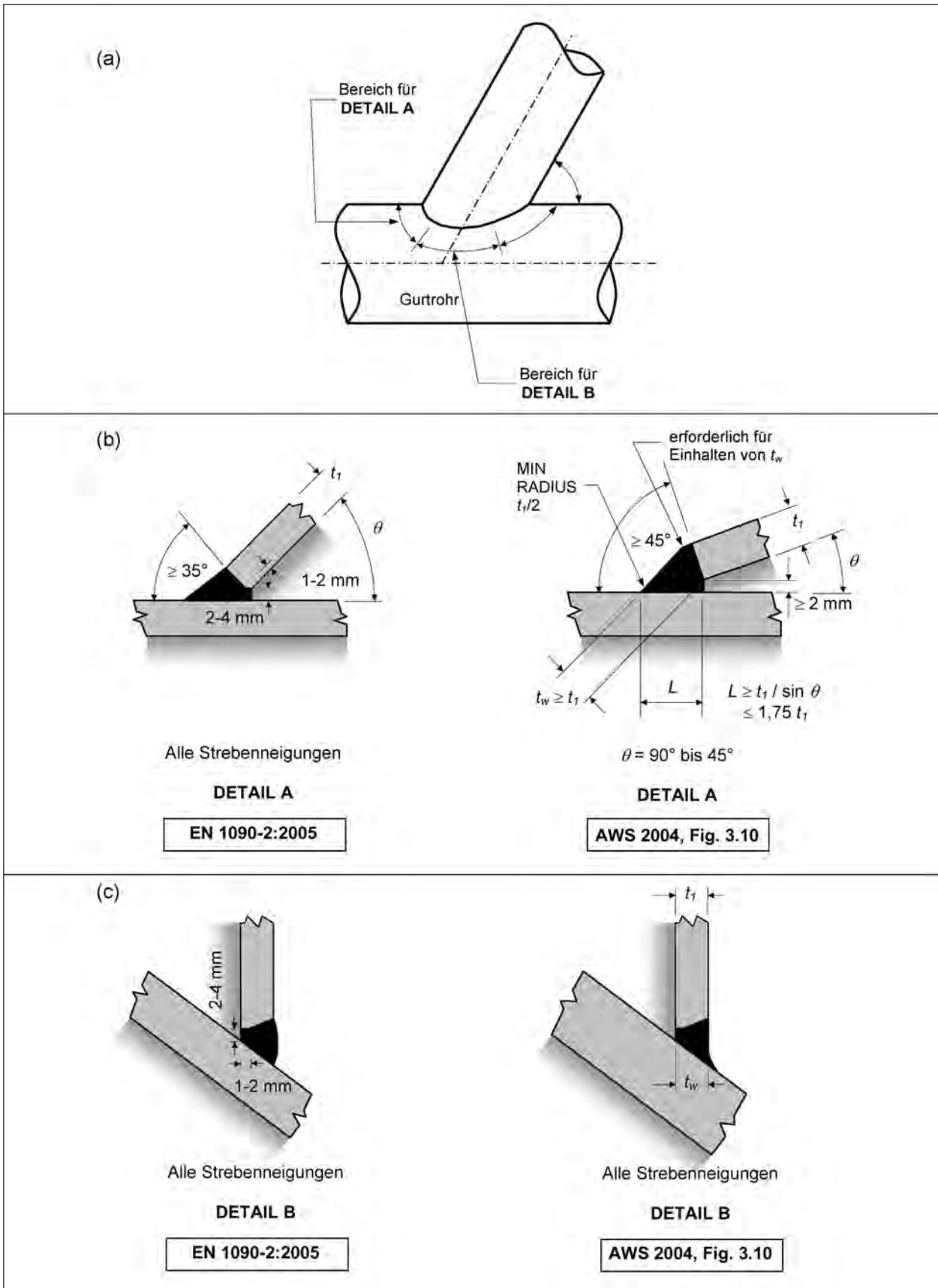
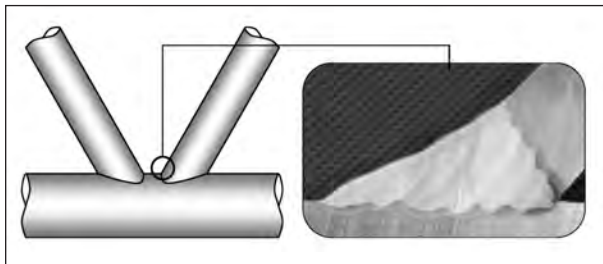


Bild 2-12: Empfohlene Nahtprofile nach EN 1090-2 und AWS, (a) Bereichsübersicht, (b) Kronenspitze, (c) Sattelbereich

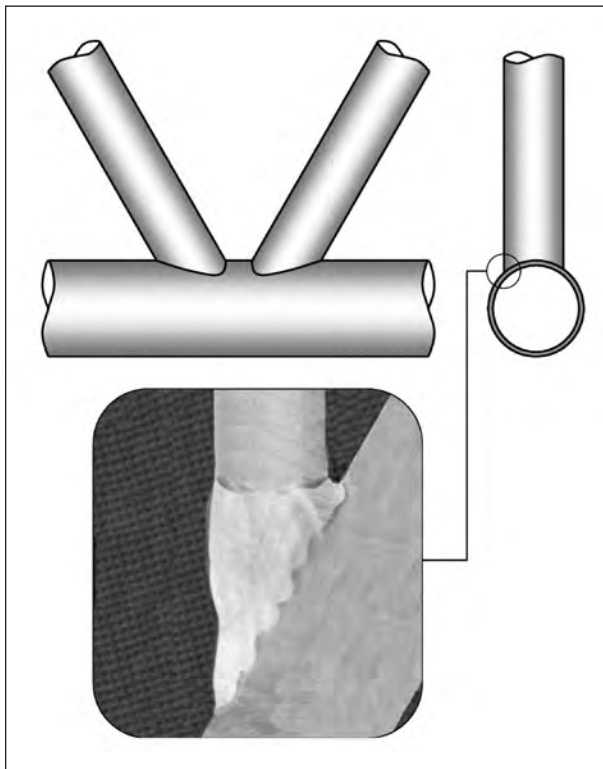
### Kronenspitze

An der Kronenspitze wurde für die im Rahmen dieses Forschungsvorhabens untersuchten Strebenneigungen stets eine HV-Naht ausgebildet, vergleiche Bild 2-15 (a), (b) bzw. Bild 2-16 (a), (b).

Das Bild 2-13 zeigt ein Beispiel für eine kerbreduzierte Nahtausbildung an der Kronenspitze. Deutlich zu erkennen sind die Zusatzlagen, welche die geometrische Kerbe am Schweißnahtübergang reduzieren sollen. Auf die Modellierung solcher Zusatzlagen wurde jedoch konservativerweise verzichtet, auch mit Blick auf alternative Formen der Kerbreduzierung wie dem WIG-Schmelzen, der Schweißnahtnachbehandlung durch UIT und HIFit etc.



**Bild 2-13:** Beispiel für die Schweißnahtausbildung an der Kronenspitze [Quelle: Prof. BUCAK 2007]



**Bild 2-14:** Beispiel für ein Schweißnahtprofil am Sattel eines K-Knotens mit  $\beta = 0,8$  [Quelle: Prof. BUCAK 2007]

### Sattelpbereich

Im Bild 2-14 ist ein Ausführungsbeispiel eines K-Knotens abgebildet. Aufgrund des großen Durchmesserverhältnisses von  $\beta = 0,80$  trifft die Strebe unter einem stumpfen Winkel auf die Gurtwand. Die Schweißnaht ist daher langgezogen und stellt im Wesentlichen eine kontinuierliche Verlängerung der Strebenwand dar. Es wurde bereits in Kapitel 2.5.2 darauf hingewiesen, dass sich bei KK-Knoten die möglichen Durchmesserverhältnisse in einem kleineren  $\beta$ -Bereich von 0,50 bis 0,60 bewegen. Die Schweißnähte fallen somit kleiner aus, stellen aber im Wesentlichen auch eine Verlängerung der Strebenwand dar, siehe Bild 2-15 (c), (d) bzw. Bild 2-16 (c), (d)

### Kronenferse

An der Kronenferse wurden sowohl eine HV-Naht als auch eine Kehlnaht untersucht, siehe Bild 2-15 (e) bis (h) bzw. Bild 2-16 (e) bis (h). Die Kehlnahtdicke wurde mit Blick auf die statischen Erfordernisse gemäß [DIN V ENV 1993-1-1:1992] generell mit  $a = 1,1 \cdot t_1$  angesetzt.

### Schweißnahtverlauf

Die Übergänge zwischen den unterschiedlichen Nahtprofilen an der Kronenspitze, Sattel und Kronenferse wurden fließend modelliert. Im Falle der Kombination aus HV-Naht und Kehlnaht (Nahtform B) wurde davon ausgegangen, dass sich die HV-Naht über  $\frac{2}{3}$  und die Kehlnaht über  $\frac{1}{3}$  des Umfangs erstrecken.

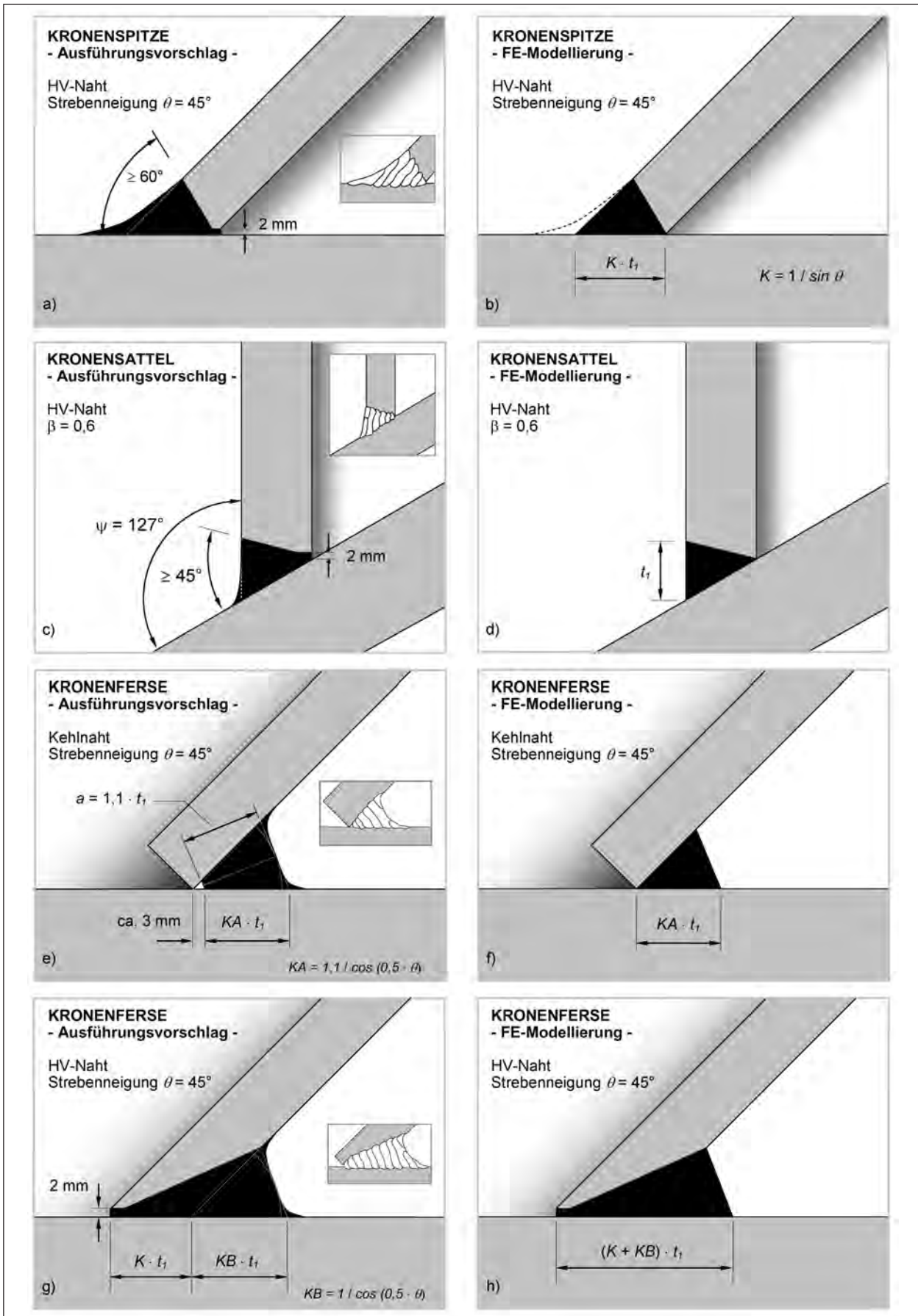
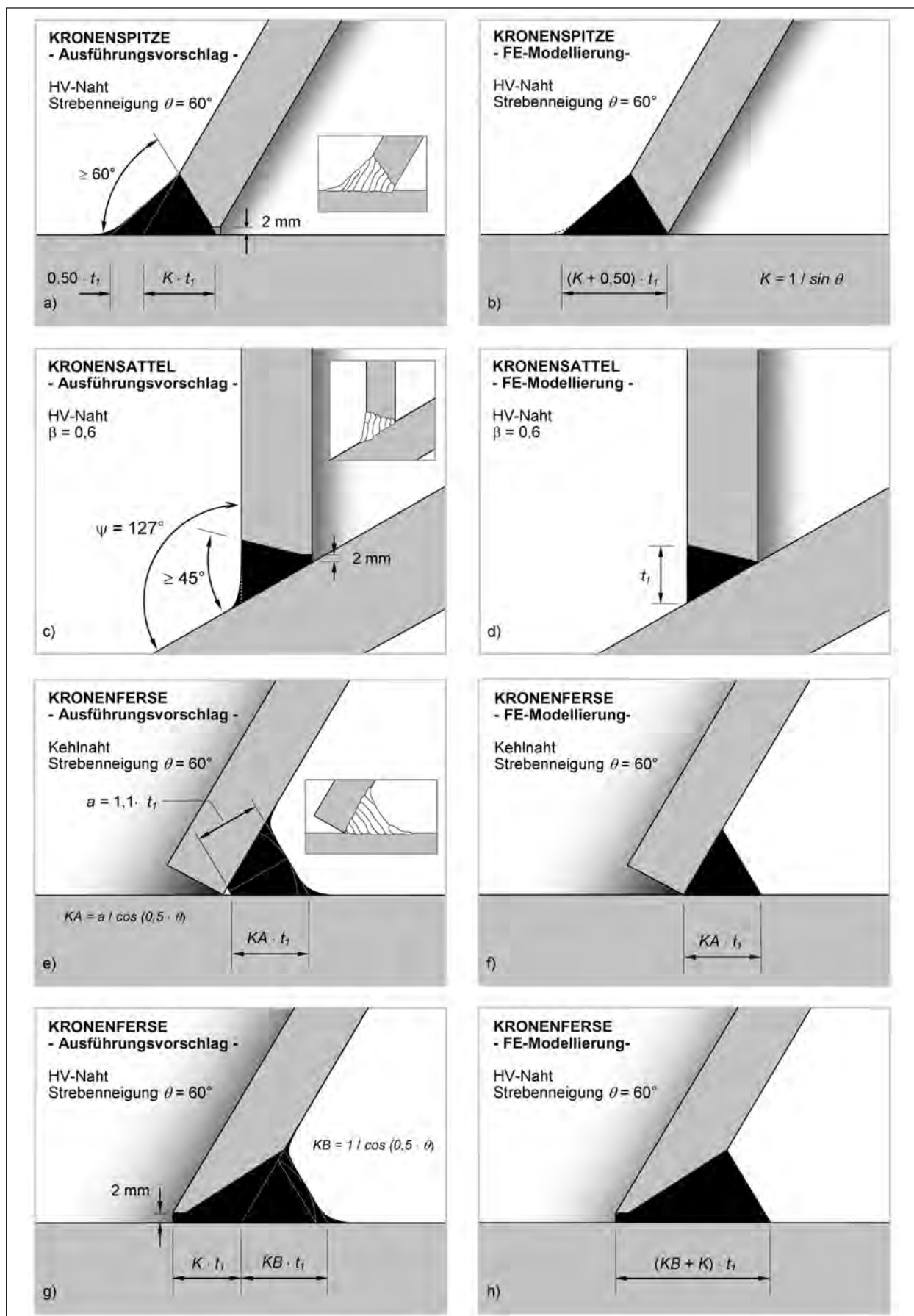


Bild 2-15: Vorgeschlagene Schweißnahtausbildung bei einer Strebenneigung von  $\theta = 45^\circ$



Bild 2-16: Vorgeschlagene Schweißnahtausbildung bei einer Strebenneigung von  $\theta = 60^\circ$

## 2.7 Datenbank der ausgeführten Brücken

### 2.7.1 Viadukt Lully (Schweiz)



Bild 2.17: Viadukt Lully

Ausführung: geschweißte KK-Knoten (1997)

Strebe:  $\varnothing$  267/11 – 25

Gurt:  $\varnothing$  508/25 – 50

$\theta = 60^\circ$ ,  $\phi = 69^\circ$

$\beta = 0,53$ ,  $\gamma = 5,08 - 10,16$

$\tau = 0,44 - 0,50$

Quelle: [SCHUMACHER 2003]

### 2.7.2 Dättwil (Schweiz)



Bild 2.18: Dättwil

Ausführung: geschweißte KK-Knoten (2001)

Strebe:  $\varnothing$  267/11 – 25

Gurt:  $\varnothing$  508/50

$\theta = 60^\circ$ ,  $\phi = 69^\circ$

$\beta = 0,53$ ,  $\gamma = 5,08$

$\tau = 0,22 - 0,50$

Quelle: [SCHUMACHER 2003]

### 2.7.3 Aarwangen (Schweiz)



Bild 2.19: Aarebrücke in Aarwangen (Bauzustand)

Ausführung: geschweißte K-Knoten (1997)

Strebe:  $\varnothing$  194/20 – 28

Gurt:  $\varnothing$  406/36 – 50

$\theta = 45^\circ$

$\beta = 0,48$ ,  $\gamma = 4,06 - 5,64$

$\tau = 0,40 - 0,78$

Quelle: [SCHUMACHER 2003],

Foto: Jahrbuch Oberaargau 2000 – Ursula Wittwer

### 2.7.4 Nesenbach (Deutschland)



Bild 2.20: Nesenbachtalbrücke

Ausführung: KK-Gussknoten (1999)

Strebe:  $\varnothing$  194/10 – 60

Gurt:  $\varnothing$  324/16 – 80

$\theta = 46^\circ$ ,  $\phi = 102^\circ$

$\beta = 0,60$ ,  $\gamma = 2,03 - 10,13$

$\tau = 0,63 - 0,75$

Quelle: [KUHLMANN et al.2002], Foto: H.-P. Günther

### 2.7.5 Korntal-Münchingen (Deutschland)



Bild 2.21: Korntal-Münchingen

Ausführung: KK-Gussknoten (2002)

Strebe:  $\varnothing 267/28 - 45$

Gurt:  $\varnothing 457/45 - 65$

$\theta = 60^\circ, \phi = 90^\circ$

$\beta = 0,58, \gamma = 3,51 - 5,07$

$\tau = 0,62 - 0,69$

Quelle: [KUHLMANN et al. 2002], Foto: H.-P. Günther

### 2.7.7 St. Kilian (Deutschland)



Bild 2.23: St. Kilian

Ausführung: Gussknoten (2006)

Strebe:  $\varnothing 298,5/25 - 60$

Gurt:  $\varnothing 610/25 - 60$

$\theta = 55^\circ, \phi = 72^\circ$

$\beta = 0,49, \gamma = 2,5 - 12,2$

$\tau = 0,5 - 1,00$

Quelle: [DENZER et al. 2006], Foto: Kuhlmann

### 2.7.6 Porto (Portugal)



Bild 2.22: Porto

Ausführung: Schweißknoten

Foto: B. Braun

## 3 Bemessungsempfehlungen

### 3.1 Vorbemerkung

In diesem Kapitel werden die Empfehlungen für die Bemessung des KK-Knotens im Straßenbrückenbau auf Materialermüdung zusammengefasst. Aufgrund der komplizierten Geometrie im Verschneidungsbereich von Gurt und Strebe des Hohlprofilknotens ist es nicht möglich, eine Nennspannung zu definieren. Diese ist jedoch die Voraussetzung für die Anwendung des Standardverfahrens nach Eurocode 3 [DIN EN 1993, Teil 1-9], des Nennspannungskonzepts. Daher muss der Ermüdungsnachweis nach dem sog. Strukturspannungskonzept erfolgen. Das Strukturspannungskonzept führt den Nachweis auf einer Spannungsebene, auf der die Spannungserhöhung infolge des versteifenden Einflusses der Schweißnaht berücksichtigt wird. Der Grundgedanke des Strukturspannungskonzeptes lässt sich nach [HAI-BACH 1989] wie folgt zusammenfassen: Beim Nachweis auf der Strukturspannungsebene steht nicht das konstruktive Detail (d. h. der KK-Knoten), sondern die Schweißkerbe (d. h. die Kehlnaht bzw. HV-Naht) im Vordergrund. Es wird davon ausgegangen, dass jede Schweißkerbe in ein sie umgebendes Strukturspannungsfeld eingebettet ist. Die Strukturspannungen stehen für eine definierte Schweißker-

be in einem festen Verhältnis zur Kerbspannung. Der Vorteil bei der Verwendung der Strukturspannungen besteht darin, dass sie sich einfacher als die Kerbspannungen ermitteln lassen.

Das Strukturspannungskonzept ist an die Voraussetzung geknüpft, dass die Rissinitiierung am Schweißnahtübergang und nicht an der unzugänglichen Schweißnahtwurzel erfolgt. Durch umfangreiche Versuche [ROMEIJN 1994, SCHUMACHER 2003] konnte diese Annahme für Hohlprofilknoten bestätigt werden.

### 3.2 Nachweis

Der Ermüdungsnachweis nach dem Strukturspannungskonzept weist gemäß [DIN EN 1993-1-9:2005] folgendes Format auf:

$$\gamma_{Ff} \cdot \Delta\sigma_{hs} \leq \frac{\Delta\sigma_{FAT}}{\gamma_{Mf}} \quad (3.1)$$

mit  $\Delta\sigma_{hs}$  als einwirkende Beanspruchung und  $\Delta\sigma_{FAT}$  als charakteristischer Widerstandswert entsprechend der der Schweißkerbe zugeordneten Strukturspannungs-Wöhlerlinie. Die Größe des Teilsicherheitsbeiwerts der Widerstandsseite  $\gamma_{Ff}$  richtet sich nach der Anforderung an die Zuverlässigkeit und die zu erwartenden Schadensfolgen und wird in [DIN EN 1993, Teil 1-9], Kapitel 3 geregelt. Der Teilsicherheitsfaktor der Einwirkung beträgt in der Regel  $\gamma_{Mf} = 1,00$ .

### 3.3 Widerstände

Auf der Widerstandsseite ist der charakteristische Festigkeitswert der entsprechenden Strukturspannungs-Wöhlerlinie anzusetzen. Für Hohlprofilknoten werden in [ZHAO et al. 2002] eigene Wöhlerlinien definiert, vergleiche Bild 3-1. Durch die Blechdickenabhängigkeit der Wöhlerlinien wird dabei der Maßstabseffekt berücksichtigt. Eine Verwendung des Kerbfallkatalogs nach [DIN EN 1993, Teil 1-9], Anhang A ist nicht möglich, da die dort hinterlegten Kerbdetails in der Regel beidseitig angeordnete Schweißnähte besitzen. Des Weiteren berücksichtigt der Anhang A nicht den Maßstabseffekt. Da im Straßenbrückenbau vorrangig dickwandige Hohlprofile eingesetzt werden, besitzt jedoch der Maßstabseffekt hier eine entsprechend große Bedeutung.

Zwischen den Strukturspannungs-Wöhlerlinien nach [ZHAO et al. 2002] und dem Kerbfallkatalog

nach [DIN EN 1993, Teil 1-9] besteht eine Verbindung. Der Festigkeitswert nach [DIN EN 1993, Teil 1-9] für den Kerbfall 112 ist mit dem Einhängepunkt der Kurve  $t = 16$  mm bei 2 Millionen nach [ZHAO et al. 2002] identisch, vergleiche Bild 3-1.

An dieser Stelle muss darauf hingewiesen werden, dass die Untersuchungen zum Maßstabseffekt noch nicht abgeschlossen sind. Experimentelle Untersuchungen zu den Ermüdungswiderständen von KK-Knoten mit den im Brückenbau typischen Wanddickenverhältnissen liegen derzeit nicht vor, sind aber Gegenstand der Forschung [NUSSBAUMER, BORGES 2008]. Der Ansatz der Ermüdungswiderstände gemäß Bild 3-1 stellt somit eine Näherung dar.

Aus baurechtlicher Sicht sind zum Zeitpunkt der Drucklegung dieses Berichts weder [DIN EN 1993, Teil 1-9], Anhang A noch [ZHAO et al. 2002] bauaufsichtlich eingeführt. Dem Tragwerksplaner wird daher empfohlen, rechtzeitig die verantwortliche Bauaufsichtsbehörde in seine Planung einzubinden.

Eine Erhöhung der Festigkeitswerte, wie sie beispielsweise bei einer Schweißnahtnachbehandlung zu erwarten ist, ist nach dem derzeitigen Stand der Forschung noch nicht zuverlässig quantifizierbar, auch wenn zum Beispiel [HOBBACHER 2003] basierend auf [HAAGENSEN, MADDOX 2006] Erhöhungsfaktoren empfiehlt.

Für Wanddicken größer als 50 mm wird auf die steigende Spröbruchgefährdung hingewiesen, die eine Extrapolation der Kurvenschar nach Bild 3-1 nach Meinung der Autoren ohne zusätzliche Versuche nicht zulässt.

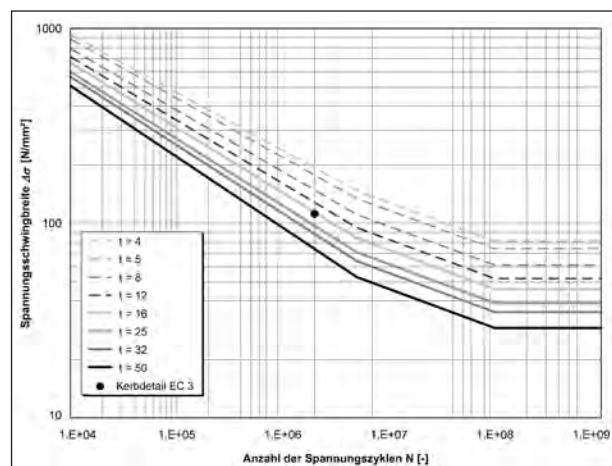


Bild 3-1: Ermüdungsfestigkeitskurven nach [ZHAO et al. 2002]

### 3.4 Einwirkungen

#### 3.4.1 Vorbemerkung

Die Ermittlung der Strukturspannungen kann entweder über eine rein elastische Analyse auf der Grundlage der Finiten Elemente oder unter Verwendung von SCF-Werten erfolgen.

#### 3.4.2 Strukturspannungen durch FEA

Eine Möglichkeit, Strukturspannungen eines KK-Knotens zu errechnen, bildet eine Finite-Elemente-Analyse (FEA), in der der KK-Knoten aus einem entsprechend feinen Netz aus Hexaeder-Elementen abgebildet wird. Die Gewinnung von Strukturspannungen aus einer Finite-Elemente-Analyse wird in der Praxis die Ausnahme bilden, da sie hohe Anforderungen an die Modellierung stellt, siehe hierzu Kapitel 5. Besonders hervorgehoben werden soll, dass eine Verifizierung des Finite-Elemente-Modells an Versuchsdaten zur Absicherung der numerischen Simulation als absolut notwendig erachtet wird. Des Weiteren wird darauf hingewiesen, dass die Strukturspannungen kein unmittelbares Ergebnis der FE-Berechnung sind. Bei den Strukturspannungen handelt es sich um theoretische Spannungen, die über eine Extrapolation gewonnen werden müssen. Eine Verwendung der unmittelbaren FE-Spannungen am Schweißnahtübergang kann unter Umständen die Strukturspannungen unterschätzen, da die meisten Postprozessoren die Spannungen am Schweißnahtübergang aus den benachbarten Elementen unterschiedlicher Dicke mitteln.

#### 3.4.3 Strukturspannungen durch SCF-Werte

Eine praxisnahe Alternative stellt die Verwendung von SCF-Werten dar, die über einen Abgleich mit Versuchsdaten abgesichert worden sind. Diese Variante der Strukturspannungsermittlung erübrigt eine aufwändige Finite-Elemente-Analyse des Hohlprofilknotens mit Hexaeder- oder Tetraeder-Elementen. Bei dieser Vorgehensweise erfolgt die Berechnung der Strukturspannungen direkt aus den Nennspannungen, das heißt aus den Spannungen, die sich aus den Stabschnittgrößen ergeben. Diese Nennspannungen werden durch eine Multiplikation mit den SCF-Werten auf das Niveau der Strukturspannungen angehoben.

#### 3.4.4 Konzept der lastfallabhängigen SCF-Werte

Die SCF-Werte (und somit die Strukturspannungen) werden in der Regel nicht für eine Lastkombination aus Normalkraft und Moment in Gurt und Streben ermittelt, da sie dann nur für diese eine Kombination zuträfen. Damit die SCF-Werte Allgemeingültigkeit besitzen, werden sie für einzelne Elementarlastfälle definiert. Die Elementarlastfälle können wiederum durch beliebige Kombination zur tatsächlichen Belastungssituation zusammengesetzt werden.

Die Überlagerung der Elementarlastfälle ist an zwei Voraussetzungen geknüpft. Die erste Voraussetzung eines solchen Vorgehens ist eine elastische Beanspruchung des KK-Knotens. Diese Voraussetzung ist erfüllt, da bei Materialermüdung im Zeitfestigkeits- und Dauerfestigkeitsbereich Plastizierungen unter den ermüdungswirksamen Beanspruchungen ausgeschlossen werden müssen. Des Weiteren ist es erforderlich, dass die Richtung der Strukturspannungen, welche die einzelnen SCF-Werte repräsentieren, nicht vom Elementarlastfall abhängig ist. Auch diese Voraussetzung ist erfüllt, da nur die senkrecht zum Schweißnahtübergang wirkenden Spannungsanteile, die sog. primären Spannungen, als ermüdungswirksam angesehen werden und daher berücksichtigt werden. (Anmerkung: Im Gegensatz zu den primären Spannungen weisen die Hauptzugspannungen für die unterschiedlichen Elementarlastfälle unterschiedliche Richtungen auf.) Siehe auch Kapitel 5.5.1 und [van WINGERDE et al.1998].

#### 3.4.5 Elementarlastfälle

In Bild 3-3 bis Bild 3-7 werden die im Rahmen dieses Forschungsvorhabens betrachteten Elementarlastfälle dargestellt. Die angreifenden Schnittgrößen werden hierbei mit ihrer positiven Definition dargestellt. Die dem jeweiligen Lastfall zugrunde zu legende Nennspannung (= Bezugsspannung für den SCF-Wert) ist in den jeweiligen Bildern definiert. Im Folgenden werden einige Erläuterungen zu den Elementarlastfällen gegeben.

##### Gurtlastfälle

Die Lastfälle 1 bis 3 spiegeln die verschiedenen Gurtbelastungen wider, Bild 3-3 (a) – (c).

##### Strebennormalkraft

Die Lastfälle 4 bis 6 repräsentieren den Lastfall der Normalkraftbelastung der Streben, Bild 3-3 (d).

Hervorzuheben ist, dass die Strebenormalkräfte einer Fachwerkwand mit gleichem Betrag angesetzt werden und somit keine resultierende Vertikalkraft aufweisen. Dieser Zustand ist annähernd bei jedem Fachwerk gegeben, da die Normalkräfte in einem Gleichgewichtszustand stehen. Untersuchungen zeigen, dass die maximalen Abweichungen in Fachwerkkonstruktionen nicht mehr als 15 % betragen [KARAMANOS et al.1997] und daher vernachlässigt werden können.

Die Strebenlastfälle erfordern bei der Ermittlung der SCF-Werte zusätzliche Überlegungen hinsichtlich der FE-Modellierung.

In den Strebenlastfällen können die im FE-Modell gewählten Randbedingungen des untersuchten KK-Knotens (einseitige Einspannung, siehe Kapitel 5.2) resultierende Gurtnormalkräfte und/oder -biegung bewirken, die die Größe der SCF-Werte an den einzelnen Streben aufgrund ihrer unsymmetrischen Verteilung beeinflussen, vergleiche Bild 3-2. Um SCF-Werte zu erhalten, die unabhängig von den gewählten Randbedingungen des FE-Modells sind, müssen daher sog. Kompensationskräfte und/oder -momente auf den Gurt aufgebracht werden.

So führen beispielsweise die Strebenormalkräfte zu einer horizontalen Resultierenden im Gurt, die

mit einer entsprechenden kompensierenden Gurtnormalkraft ins Gleichgewicht gesetzt werden muss.

$$N_{eq} = F \cdot (1 + m) \cdot \cos \theta \quad (3.2)$$

Siehe auch Bild 3-3.

Schließen zusätzlich die Streben außermittig an den Gurt an, so wird im KK-Knoten ein Exzentrizitätsmoment erzeugt, das aufgrund der betrachteten Geometrien zu einer zusätzlichen Biegebeanspruchung des Gurts mit unsymmetrischer Verteilung führt. In einer Fachwerkkonstruktion wird das Exzentrizitätsmoment im Wesentlichen auch allein vom Gurt abgetragen (Trägheitsmomente der Strebe und des Gurts stehen im Verhältnis 1:10 im betrachteten Parameterbereich), jedoch wird sich das Biegemoment gleichmäßig zu beiden Seiten des Gurtes verteilen. Um diesen Einfluss der Randbedingungen im FE-Modell zu bereinigen, sind daher kompensierende Gurtmomente erforderlich, die sich bei einer positiven Ausmitte  $e$  bestimmen zu:

$$M_{eq,ibp} = F \cdot (1 + m) \cdot e \cdot \cos \theta \cdot \sin(\phi - 45^\circ) \quad (3.3)$$

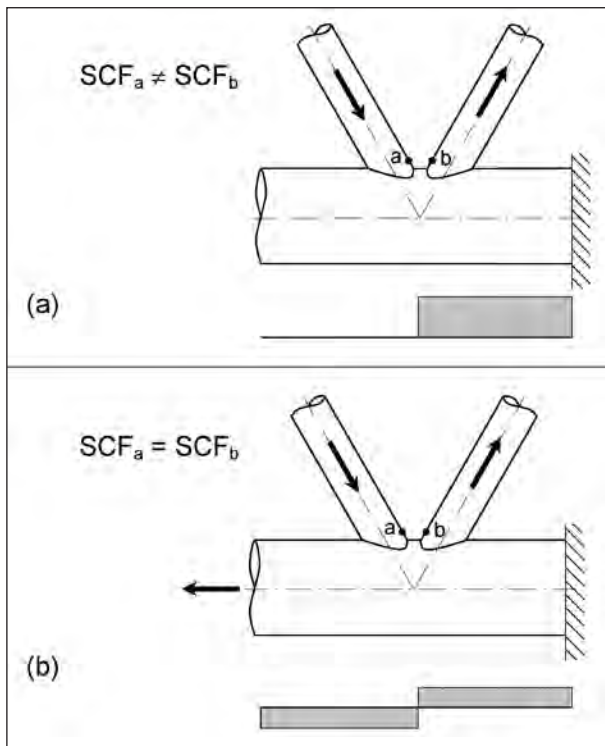
$$M_{eq,obp} = F \cdot (1 + m) \cdot e \cdot \cos \theta \cdot \cos(\phi - 45^\circ) \quad (3.4)$$

In [KARAMANOS et al.1997] wurden nur kompensierende Gurtnormalkräfte verwendet, da ausschließlich KK-Knoten-Geometrien ohne Ausmitte Gegenstand der Betrachtung waren. Von [SCHUMACHER 2003] wurden zwar ausmittige Knotengeometrien untersucht, sie vernachlässigte aber die Kompensationsmomente für den Gurt.

Der Faktor  $m$  in den obigen Gleichungen wird als Gleichgewichtsfaktor eingeführt und soll folgenden Umstand berücksichtigen: Auch wenn innerhalb einer Fachwerkwand die Strebenormalkräfte näherungsweise im Gleichgewicht stehen, so können doch Unterschiede zwischen den Fachwerkwänden auftreten. Für  $m = -1$  stehen auch die Fachwerkwände im vollständigen Gleichgewicht. Durch Variation des Faktors  $m$  werden die sog. Carry-over-Effekte eingefangen, das heißt der Einfluss auf die SCF-Werte für die Streben der einen Fachwerkwand, der von einer Belastung der anderen Fachwerkwand ausgeht.

### Strebetorsion

Strebetorsionsbeanspruchungen werden nicht berücksichtigt, da sie durch eine Kombination der Lastfälle 7 bis 9 und 10 bis 12 dargestellt werden können.



**Bild 3-2:** Gurtnormalkraftverteilung unter Strebenbelastung (a) ohne kompensierende Gurtnormalkraft, (b) mit kompensierender Gurtnormalkraft

### Strebenbiegung in der Ebene der Fachwerk- wand

Im Gegensatz zu den Strebennormalkräften, die immer im Gleichgewicht stehen, muss das für die Biegemomente in den Streben zwangsläufig nicht zutreffen. Es werden daher zum einen drei Lastfälle 7 bis 9 ( $m = -1, 0, +1$ ) untersucht, bei denen die Strebenbiegung in der Fachwerk wand, auf die Bezug genommen wird, im Gleichgewicht steht, siehe Bild 3-4. Zum anderen werden die gleichen Lastfälle mit unausgeglichener Strebenbiegung in den Fachwerk wänden untersucht (Lastfälle 107 bis 109), siehe Bild 3-5. Für den letzten Fall sind wiederum kompensierende Gurtmomente erforderlich.

$$M_{eq,ibp} = -M_{ipb,br} \cdot (1+m) \cdot \cos(\phi - 45^\circ) \quad (3.5)$$

$$M_{eq,obp} = -M_{ipb,br} \cdot (1-m) \cdot \sin(\phi - 45^\circ) \quad (3.6)$$

Durch die Betrachtung dieser beiden Arten von Strebenbiegung werden, wie bereits oben erwähnt, die sog. Carry-over-Effekte berücksichtigt.

### Strebenbiegung aus der Ebene der Fachwerk- wand

Hier gelten gleichermaßen die Anmerkungen zur Strebenbiegung in der Fachwerkebene, vergleiche die Lastfälle 10 bis 12 in Bild 3-6 und die Lastfälle 110 bis 112 in Bild 3-7. Die Strebenbiegung aus der Fachwerk wand heraus steht mit der Torsion im Gurt im Gleichgewicht. Da die Torsion nicht weiter betrachtet wird, wurde für diesen Elementarlastfall auf eine Kompensation verzichtet.

#### 3.4.6 Superposition

Die Strukturspannung an einer Stelle  $i$  der Gurt-Streben-Verschneidung ergibt sich somit als Superposition der Strukturspannungen aus den Elementarlastfällen zu:

$$\begin{aligned} \sigma_{hs,i} = & SCF_{i,ax,ch} \cdot \sigma_{ax,ch} + SCF_{i,ipb,ch} \cdot \sigma_{ipb,ch} \\ & + SCF_{i,opb,ch} \cdot \sigma_{opb,ch} + SCF_{i,ax,br} \cdot \sigma_{ax,br} \\ & + SCF_{i,ipb,br} \cdot \sigma_{ipb,br} + SCF_{i,opb,br} \cdot \sigma_{opb,br} \end{aligned} \quad (3.7)$$

Der erste Index der Spannungen und der zweite Index der SCF-Werte beziehen sich jeweils auf die Art der Belastung (Normalkraft, Biegung in oder aus der Ebene) und der zweite bzw. dritte auf den belasteten Fachwerkstab (Gurt oder Strebe). Die Lastfälle der Strebenbiegung in der Ebene und aus

der Ebene der Fachwerk wand können jeweils über zwei Anteile verfügen (ausgeglichene und unausgeglichene Strebenbiegung).

Auf den wissenschaftlichen Hintergrund, der für das Verständnis der SCF-Ermittlung erforderlich ist, wird detailliert in Kapitel 5 eingegangen.

Die Nachweisführung wird im Kapitel 3.6 anhand eines Anwendungsbeispiels ausführlich erläutert.

## 3.5 Zusammenstellung der SCF-Werte

### 3.5.1 Vorbemerkung

Dieser Abschnitt beinhaltet eine Zusammenstellung der SCF-Werte für die einzelnen Elementarlastfälle in Diagrammform. Die SCF-Werte werden in der Systematik von CIDECT [ZHAO et al. 2002] für acht Stellen auf der Verschneidungskurve von Strebe und Gurt angegeben. Ausgehend von einem Basiswert  $SCF_0$ , der für die Geometriekombination  $\gamma = 12$  und  $\tau = 0,5$  bei Ausführung der Nahtform A und des Mindestspaltmaßes bestimmt wird, werden die SCF für beliebige Kombinationen von  $\gamma$  und  $\tau$  und abweichende Nahtformen und Spaltmaße über Korrekturfaktoren ermittelt. Dieses Vorgehen erfolgt orts- und lastfallbezogen.

### 3.5.2 Auswertungsorte

Für die in Bild 3-8 dargestellten acht Stellen können die SCF-Werte der folgenden Zusammenstellung entnommen werden, siehe Bild 3-9 bis Bild 3-106.

Der maximale SCF-Wert pro Lastfall tritt teilweise nicht exakt an einer der acht Stellen auf. Dieser Umstand ist bei der Bemessung zu berücksichtigen. [KUHLMANN, EULER 2008] enthält detaillierte Angaben, die hier zusammenfassend ausgewertet sind.

Für Auswertungsorte, bei denen der SCF-Wert vernachlässigbar klein ist, wurde auf die Darstellung in den folgenden Diagrammen verzichtet.

#### Lastfall 1

Für den Gurt ergibt sich für folgende Auswertungsorte ein vernachlässigbar kleiner SCF-Wert: Stellen 03, 07.

#### Lastfall 2 und 3

Für den Gurt ergibt sich für folgende Auswertungsorte ein vernachlässigbar kleiner SCF-Wert: Stellen

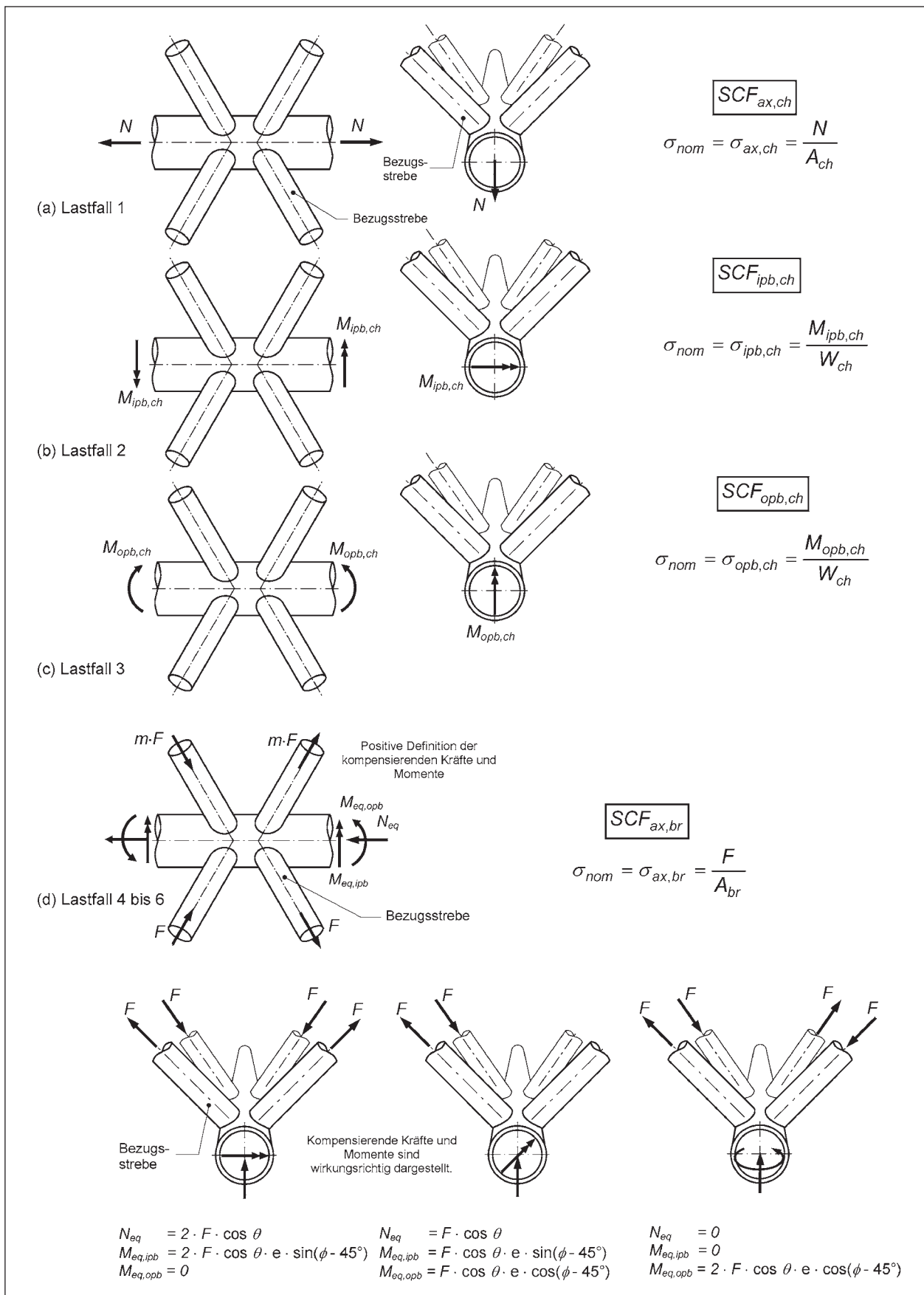
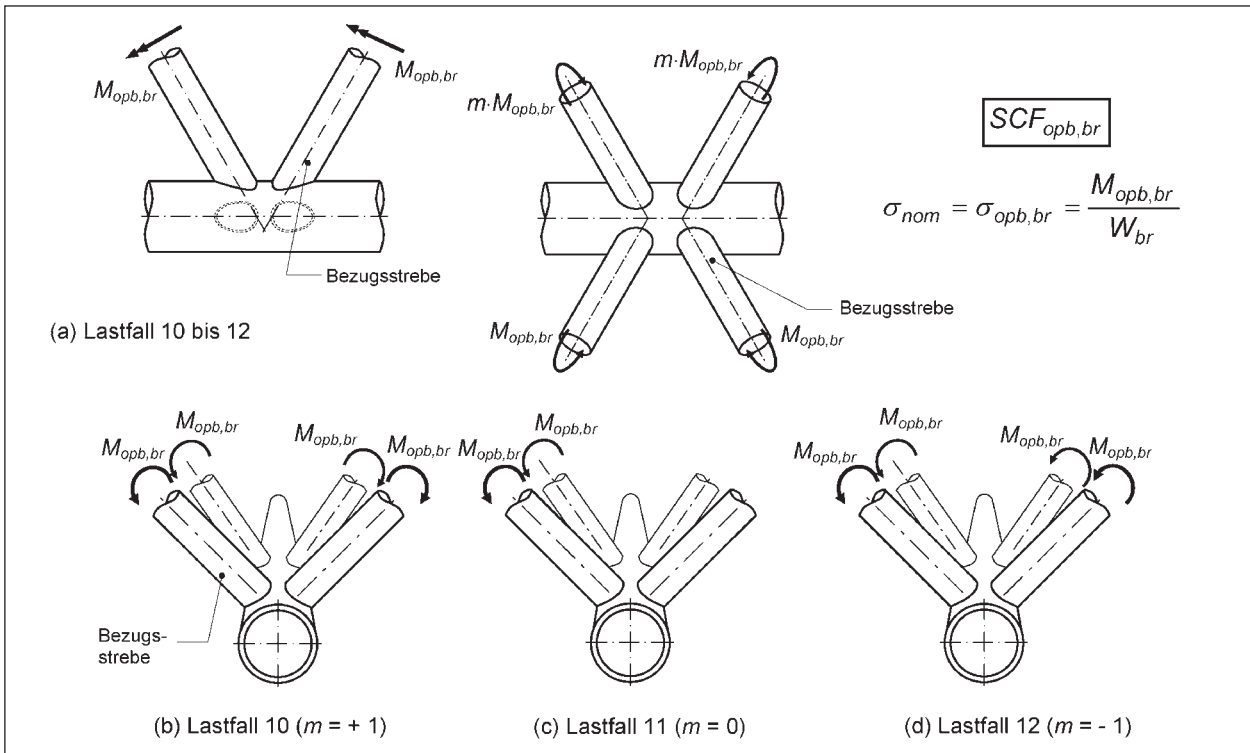


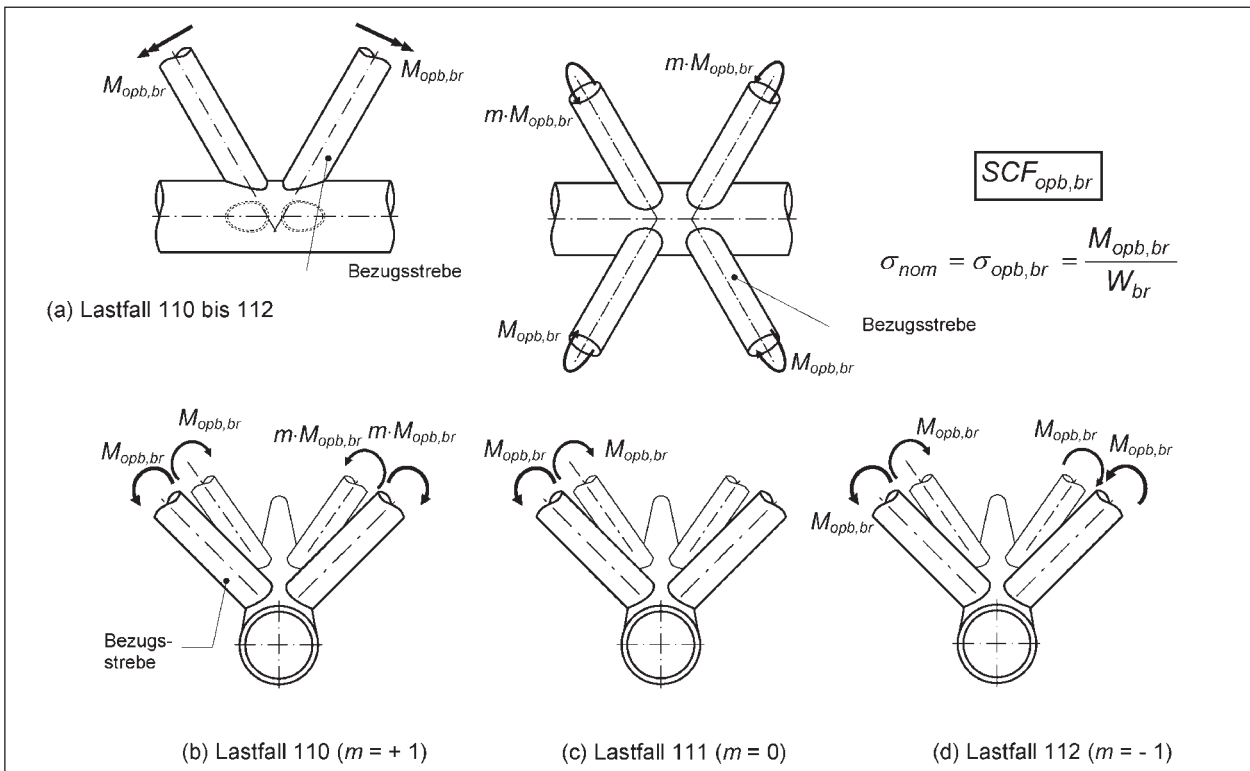
Bild 3-3: Untersuchte Lastfälle mit Angabe der Nennspannung: (a) bis (c) Gurtlastfälle, (d) bis (g) Strebennormalkraft







**Bild 3-6:** Untersuchte Lastfälle mit Angabe der Nennspannung: (a) bis (c) unausgeglichene Strebenbiegung aus der Ebene der Fachwerkwand



**Bild 3-7:** Untersuchte Lastfälle mit Angabe der Nennspannung: (a) bis (c) ausgeglichene Strebenbiegung aus der Ebene der Fachwerkwand

02, 03, 04, 07 für Lastfall 2 und Stellen 03, 06, 07, 08 im Lastfall 3.

Für die Strebe wurde auf eine Vertafelung der SCF-Werte für den Lastfall 3 verzichtet, da Tabelle 3-1 gilt.

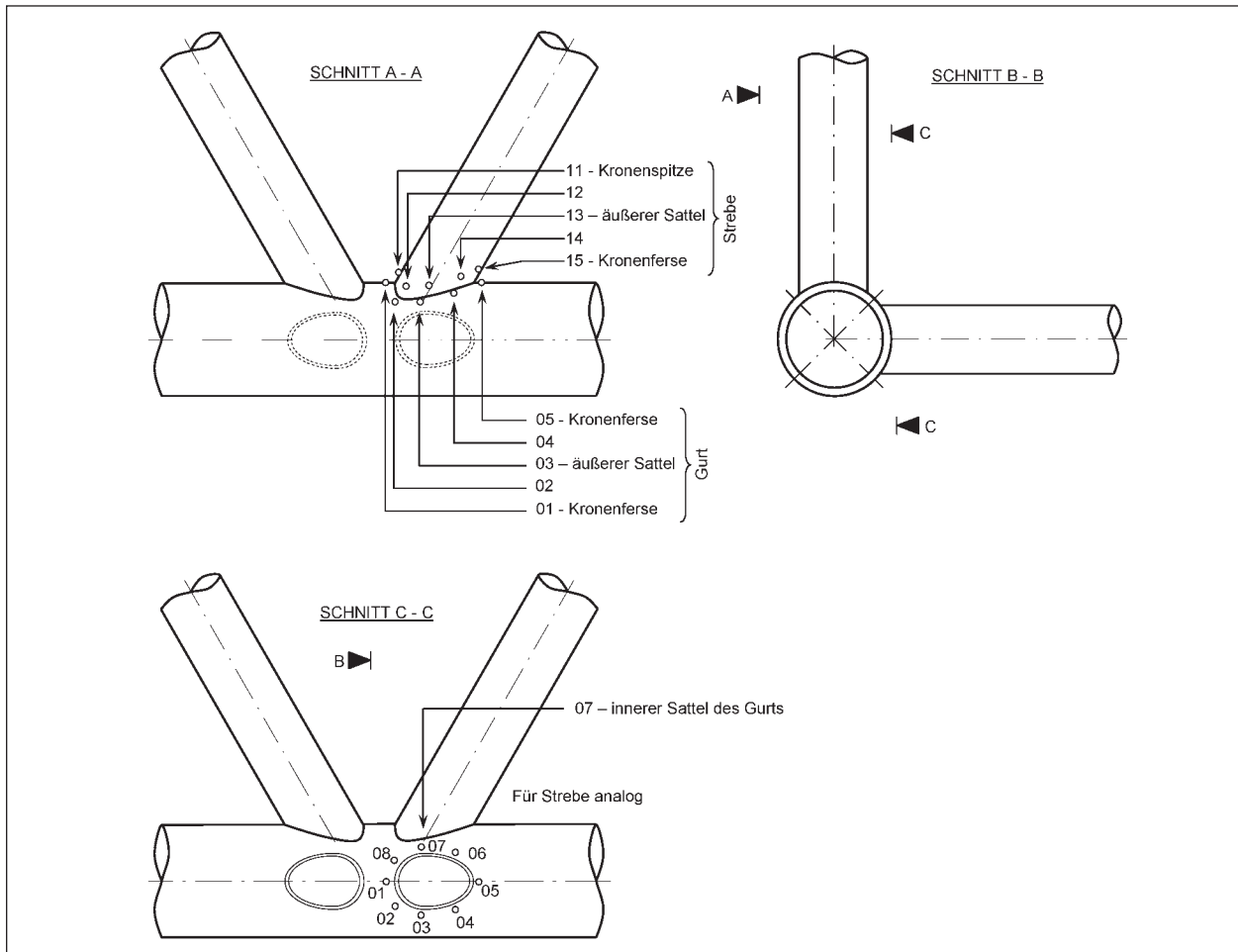


Bild 3-8: Auswertungsorte entlang der Verschneidung von Gurt und Bezugsstrebe

Stelle ... im Lastfall 3	identisch mit Stelle ... im Lastfall 2
11	11
12	18
13	17
14	16
15	15
16	14
17	13
18	12

Tab. 3-1: SCF-Werte der Strebe im Lastfall 3

### Lastfall 7 bis 9

Für die Strebe ergibt sich für folgende Auswertungsorte ein vernachlässigbar kleiner SCF-Wert: Stellen 13, 17.

### Lastfall 10 bis 12 bzw. 110 bis 112

Für den Gurt und die Strebe ergibt sich für folgende Auswertungsorte ein vernachlässigbar kleiner SCF-Wert: Stellen 01, 05, 11, 15.

### 3.5.3 Mindestwerte der SCF

In [ZHAO et al. 2002] werden für die einzelnen Elementarlastfälle Mindestwerte definiert. In [van WINGERDE et al. 2001] wird erläutert, dass der Hintergrund der Mindestwerte aus der Vereinfachung der Bemessungshilfen resultiert. Es zeigt sich jedoch, dass vor allem für kleine Gurtschlankheiten  $\gamma$  diese Mindestwerte zu einer teilweise sehr auf der sicheren Seite liegenden Spannungsermittlung führen. Des Weiteren ist zu bedenken, dass sich die Frage nach Mindest-SCF-Werten bei einer FE-Berechnung unter kombinierter Belastung (= Kombination aus mehreren Elementarlastfällen) gar nicht stellt. Es wurde daher im Sinne einer wirtschaftlichen Auslegung der KK-Knoten auf die Definition von Mindest-SCF-Werten verzichtet.

### 3.5.4 Anwendung der SCF-Diagramme

Die Darstellung der SCF-Verläufe orientiert sich an der Darstellungsweise in CIDECT [ZHAO et al. 2002]. Die Diagramme einer Seite gelten jeweils für einen Lastfall und eine Auswertungsstelle für den Gurt oder für die Strebe.

Das jeweils oberste Diagramm zeigt den  $SCF^0$ -Verlauf für den sog. Standardfall mit  $\gamma = 12$ ,  $\tau = 0,5$ , Nahtform A und einfaches Mindestspaltmaß. Handelt es sich bei dem betrachteten Elementarlastfall um einen Strebenlastfall, so wird ferner davon ausgegangen, dass der Gleichgewichtsfaktor  $m = 0$  beträgt. Das heißt, eine K-Knotenbelastung (nur zwei belastete Streben) bildet hier die standardmäßige Belastung.

Für abweichende Geometrien bzw. Belastungen sind Korrekturfaktoren anzuwenden, sodass sich der endgültige SCF-Wert wie folgt zusammensetzt:

$$SCF_{i, \text{Lastfall}} = SCF_{i, \text{Lastfall}}^0 \cdot (K_1 + K_2) \cdot K_3 \cdot K_4 \quad (3.8)$$

#### Korrekturfaktor $K_1$

Dieser Faktor berücksichtigt eine Abweichung der betrachteten Geometrie vom Standardfall mit  $\gamma = 12$  und  $\tau = 0,5$ .

#### Korrekturfaktor $K_2$

Dieser Faktor wird nur für die Strebenlastfälle definiert. Er berücksichtigt eine andere als die K-Knotenbelastung. Es ist zu beachten, dass der Korrekturfaktor  $K_2$  zum Faktor  $K_1$  addiert wird, siehe Gleichung (3.8).

#### Korrekturfaktor $K_3$

Hiermit wird der Einfluss einer Verdopplung des Spaltmaßes  $g_L$  berücksichtigt.

#### Korrekturfaktor $K_4$

Hiermit wird der Einfluss der Nahtform B, das heißt der Fersenkehlnaht, berücksichtigt.

#### Hinweise

Der Korrekturfaktor  $K_1$  ist im zweiten Diagramm und die Korrekturfaktoren  $K_2$  bis  $K_4$  sind im Kasten am unteren Blattrand der folgenden Bilder hinterlegt. Die Korrekturfaktoren nähern in der Mehrzahl

die Ergebnisse der FE-Untersuchungen mit kleiner  $\pm 10\%$  an.

Die Korrekturwerte  $K_3$  und  $K_4$  stellen eine Näherung dar, da sie unabhängig vom Gleichgewichtsfaktor  $m$  sowie den Parametern  $\tau$ ,  $\beta$ ,  $\gamma$  gelten. Damit die Näherung zu sicheren Ergebnissen führt, ist folgender Grundsatz zu beachten:

Wirkt der betrachtete Lastfall in der Kombination aller Lastfälle günstig, dann sollten Korrekturwerte  $K_3 > 1$  und  $K_4 > 1$  nicht in Ansatz gebracht werden.

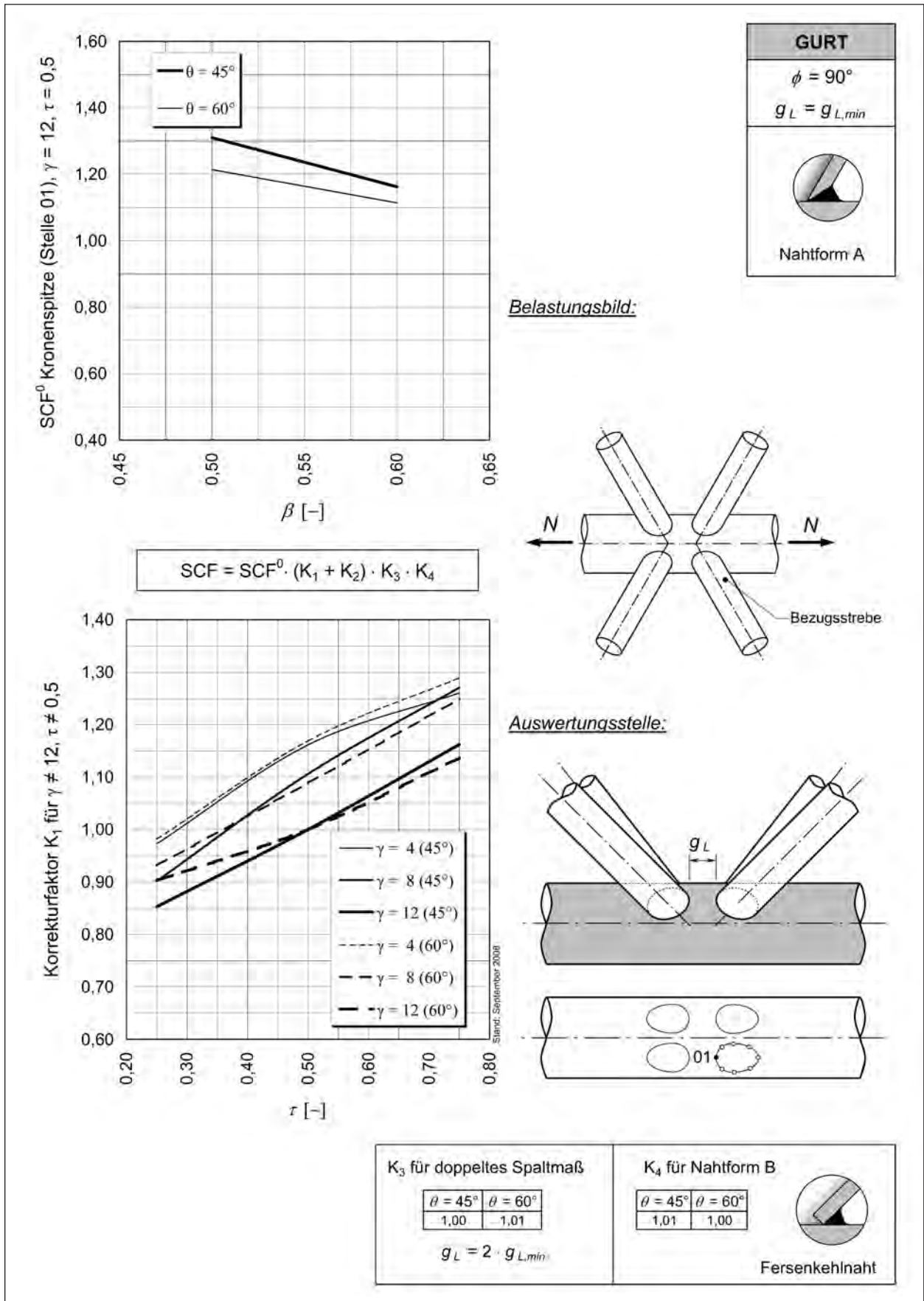
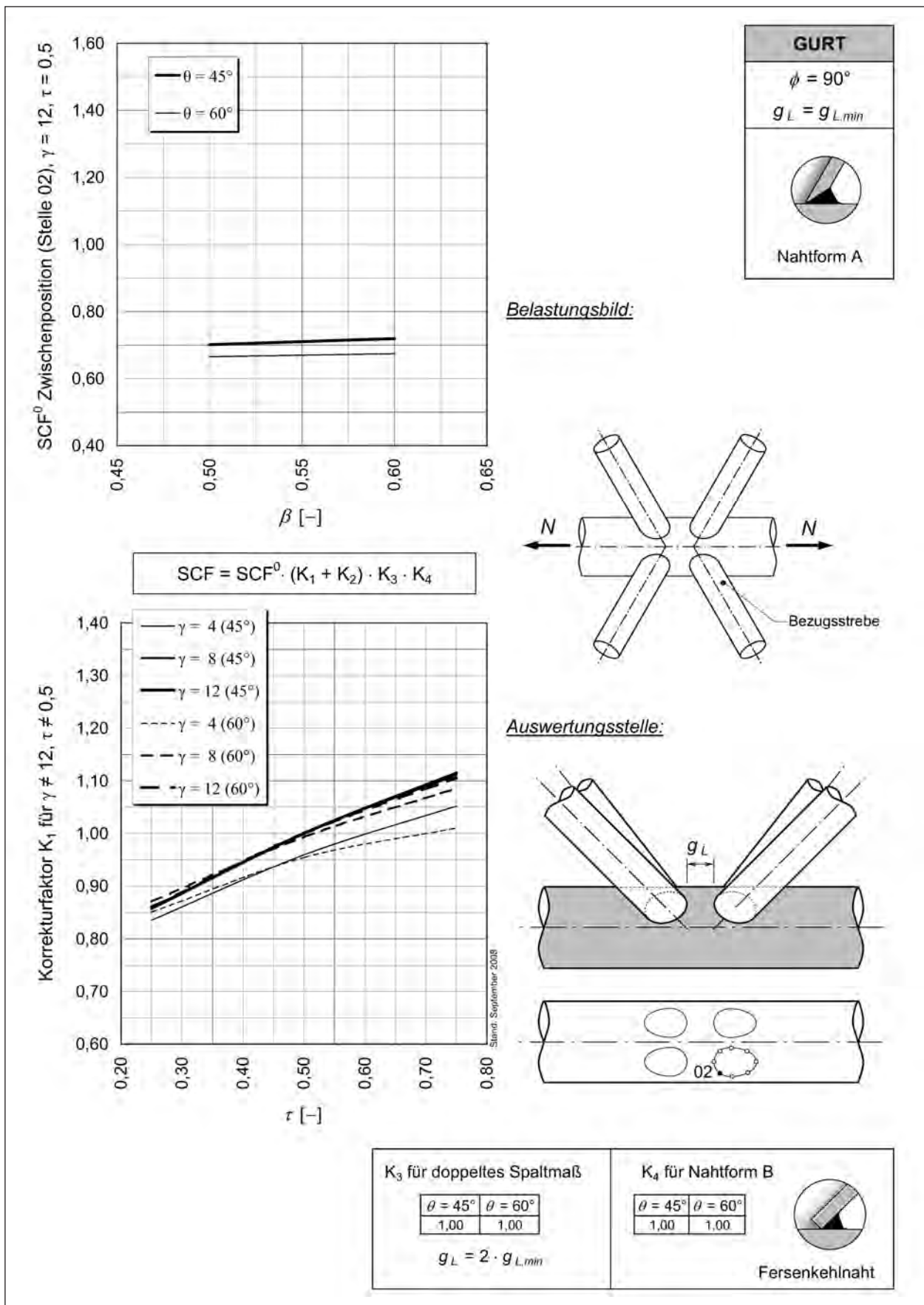


Bild 3-9: SCF<sub>ax, ch</sub> für Lastfall 1 (Gurtnormalkraft), Kronenspitze (01), Gurt



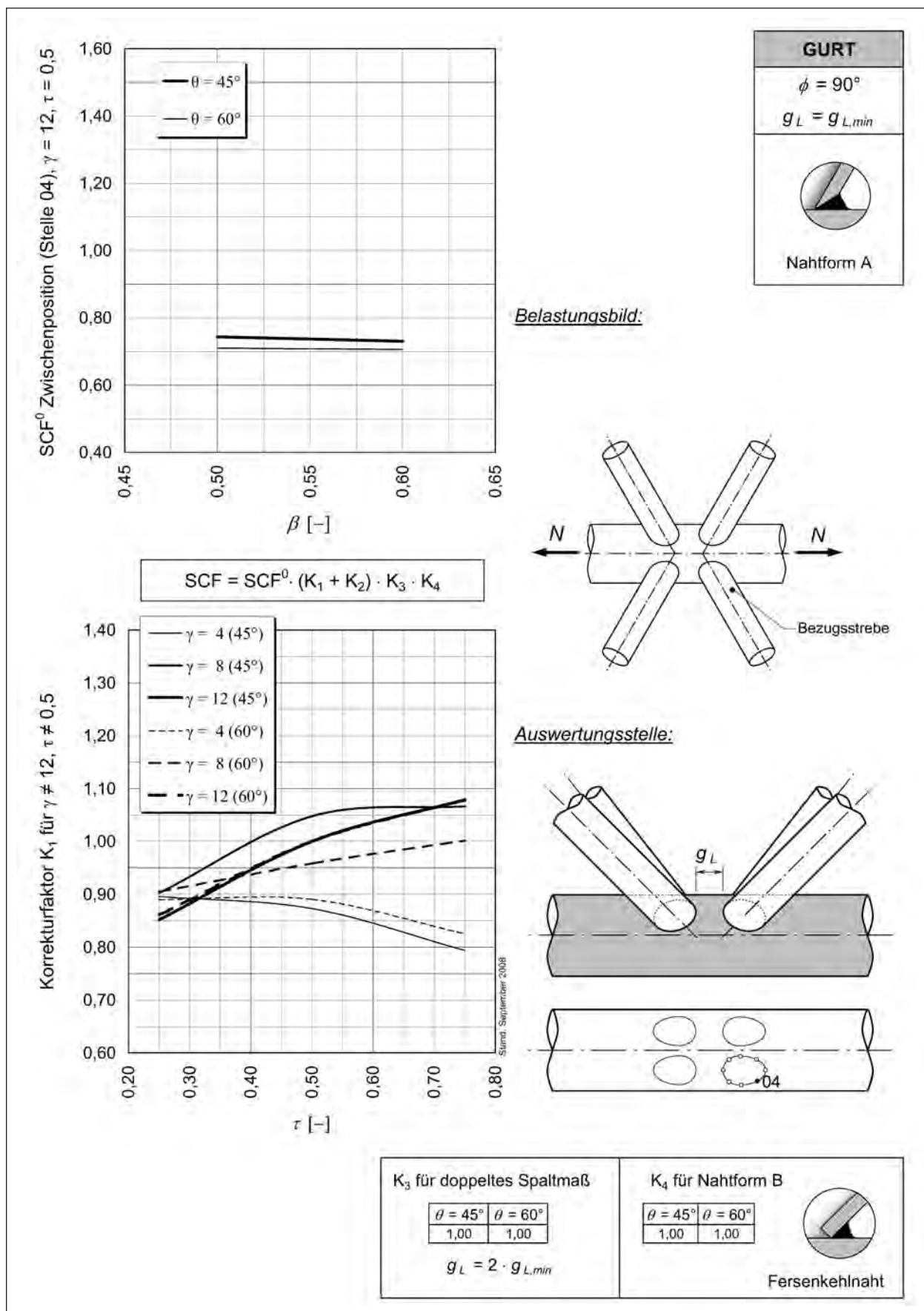


Bild 3-11: SCF<sub>ax, ch</sub> für Lastfall 1 (Gurtnormkraft), Zwischenposition (04), Gurt

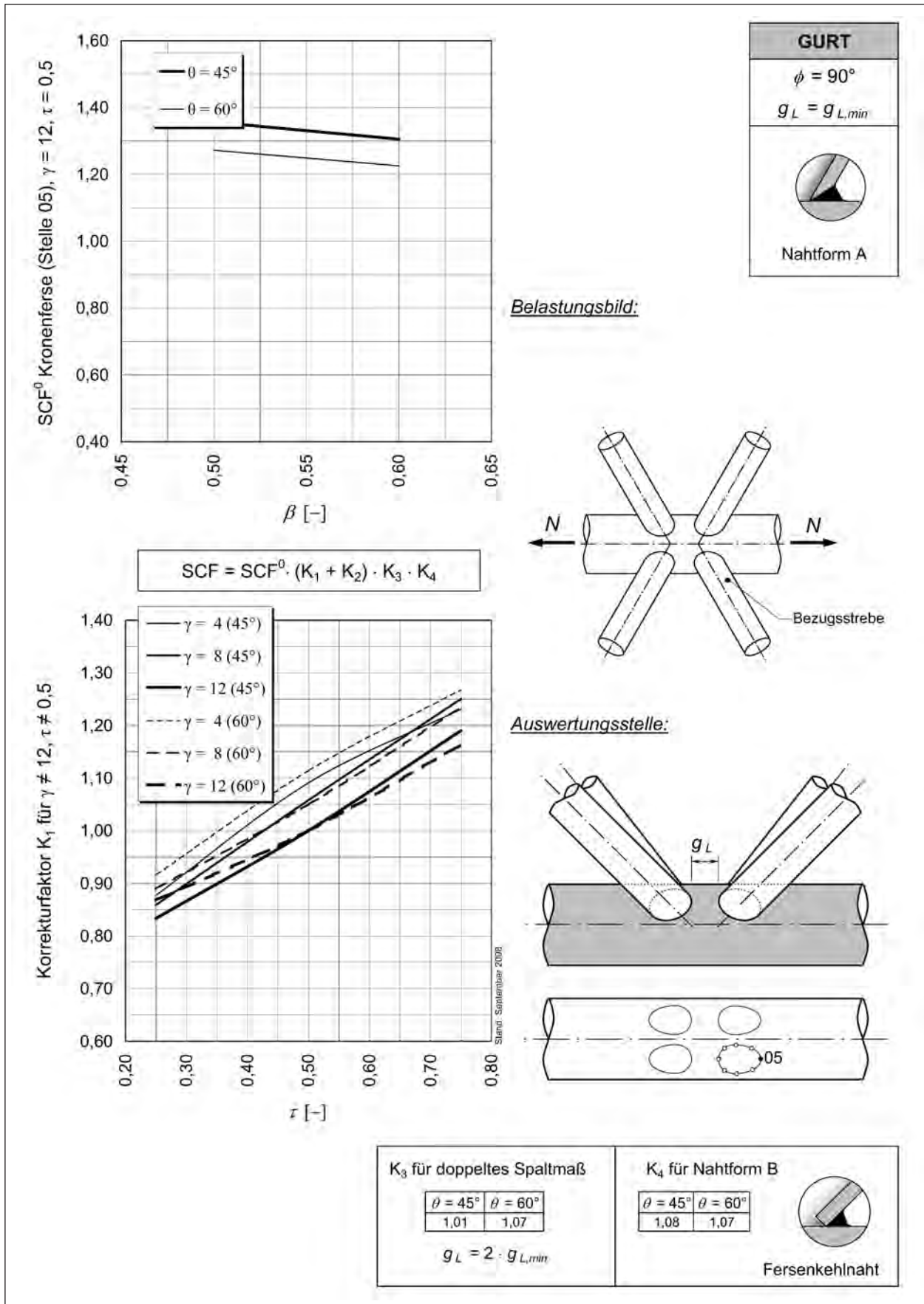


Bild 3-12: SCF<sub>ax, ch</sub> für Lastfall 1 (Gurtnormalkraft), Kronenferse (05), Gurt



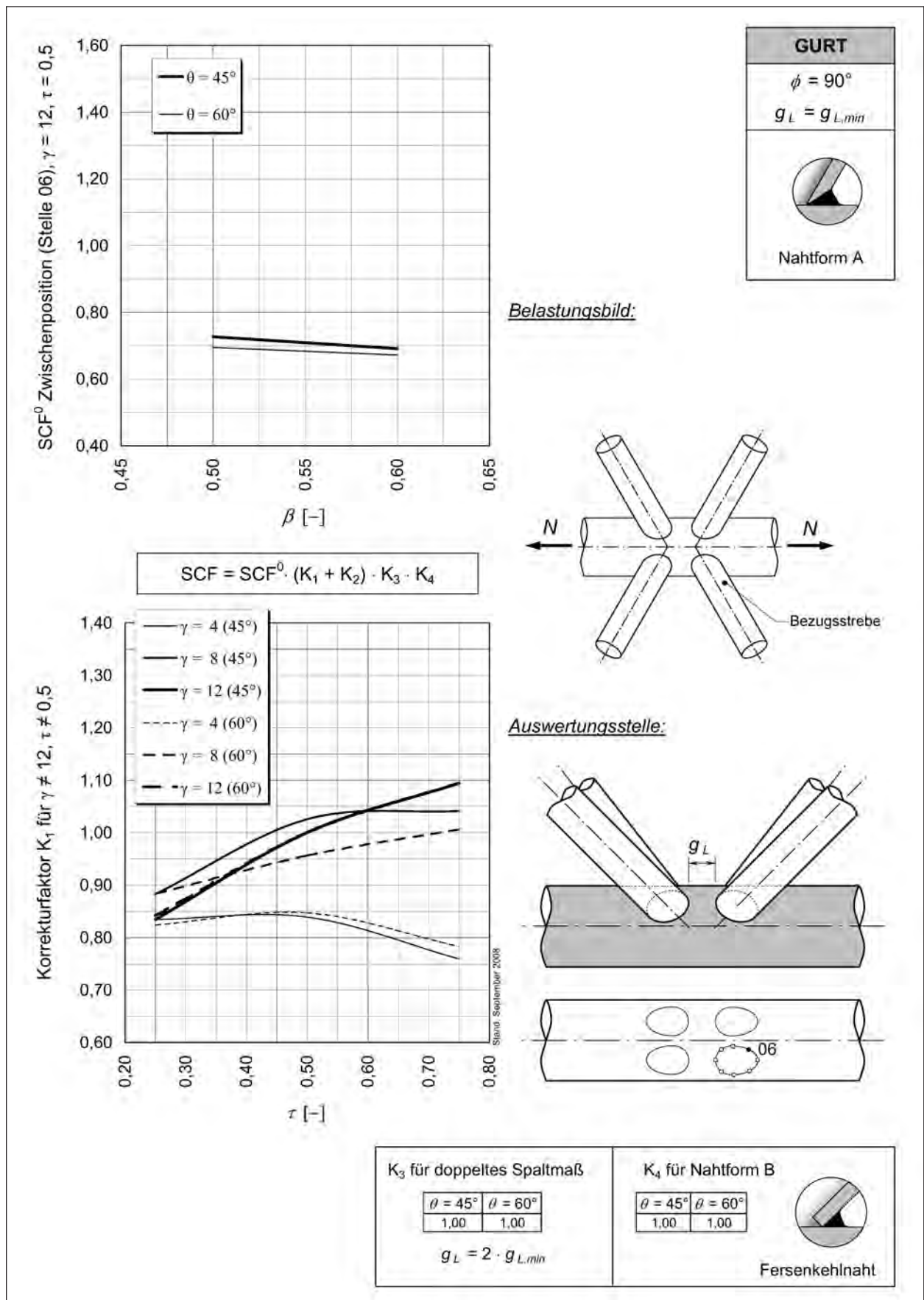
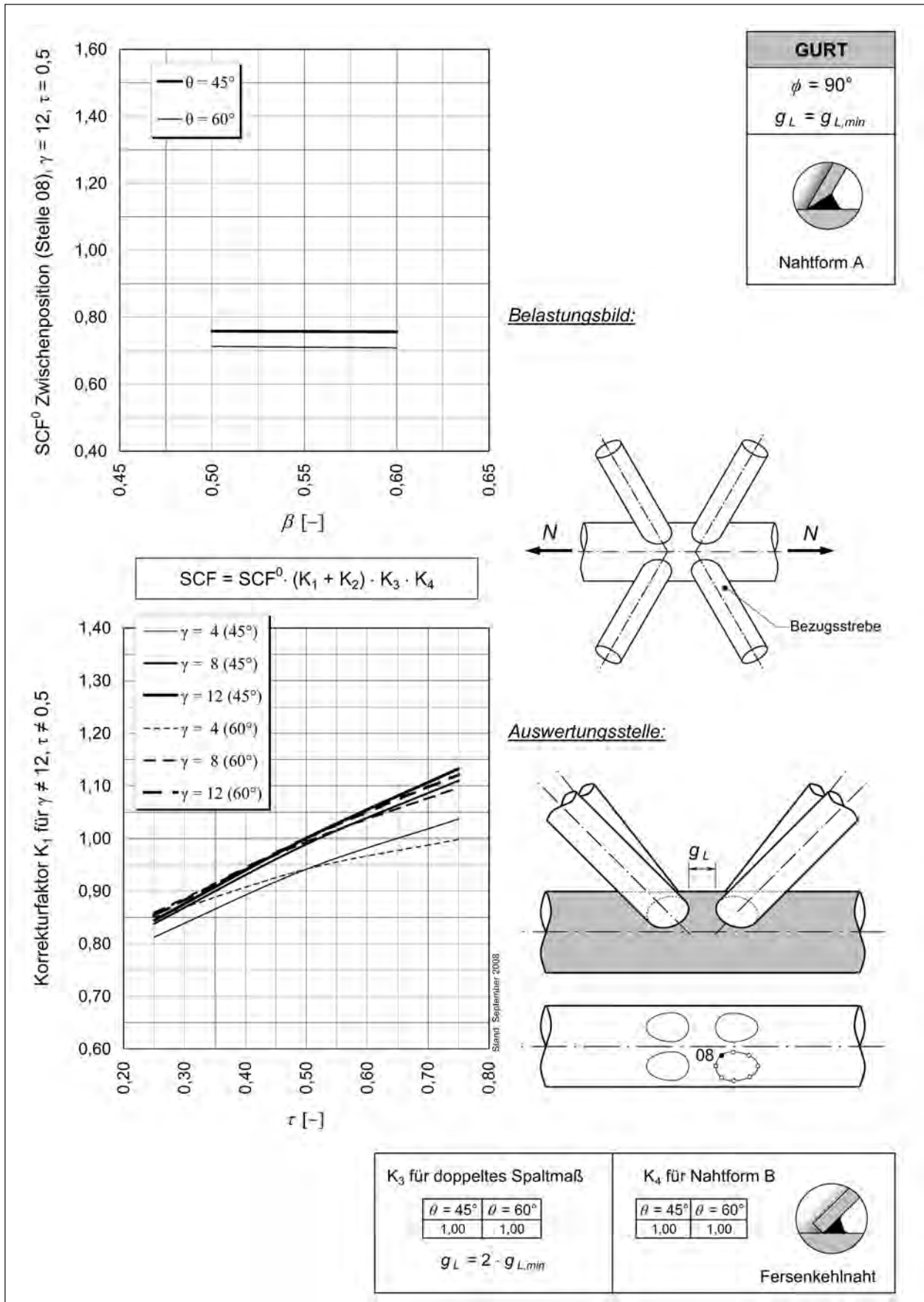


Bild 3-13: SCF<sub>ax, ch</sub> für Lastfall 1 (Gurtnormkraft), Zwischenposition (06), Gurt



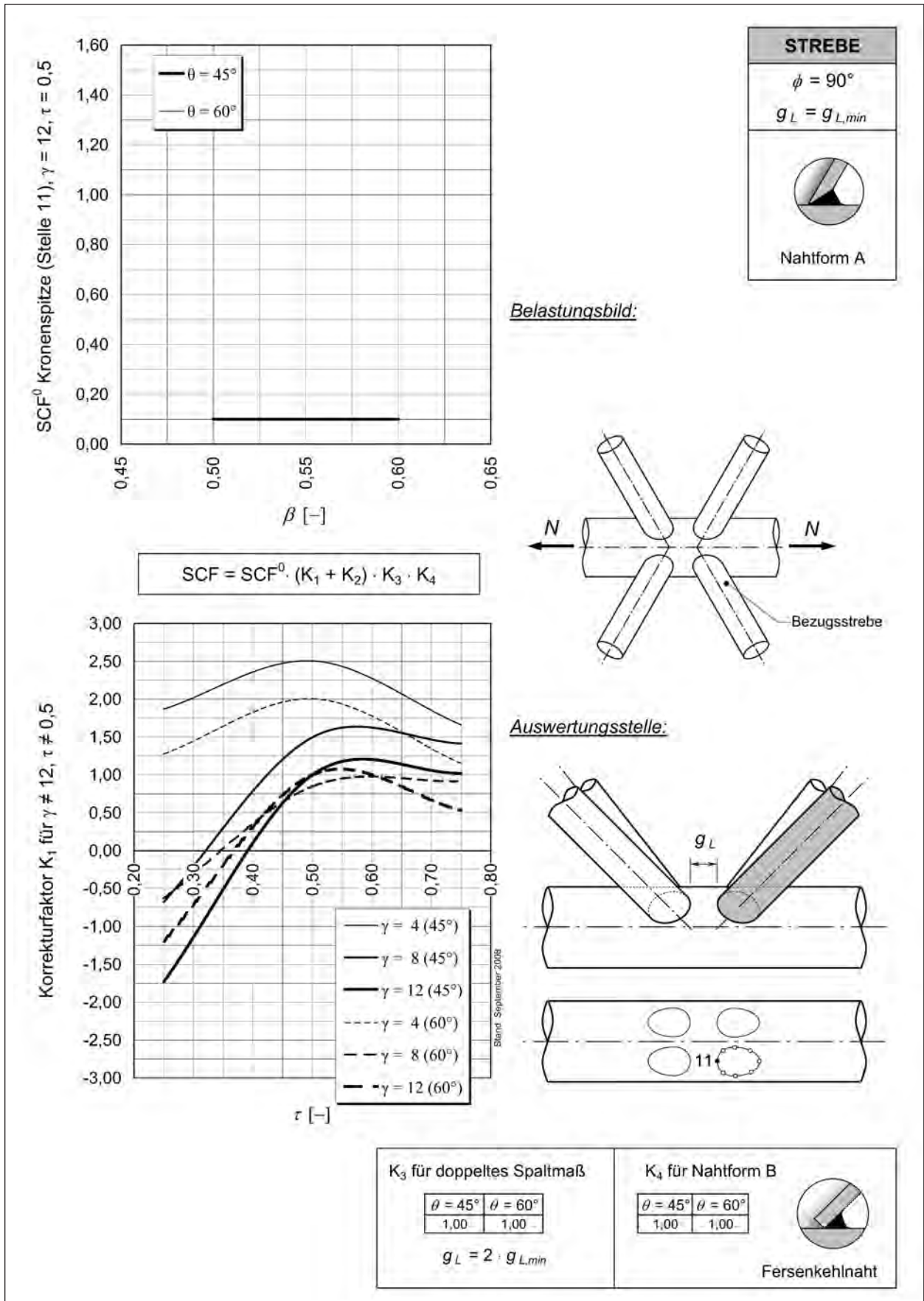


Bild 3-15: SCF<sub>ax, ch</sub> für Lastfall 1 (Gurtnormalkraft), Kronenspitze (11), Strebe

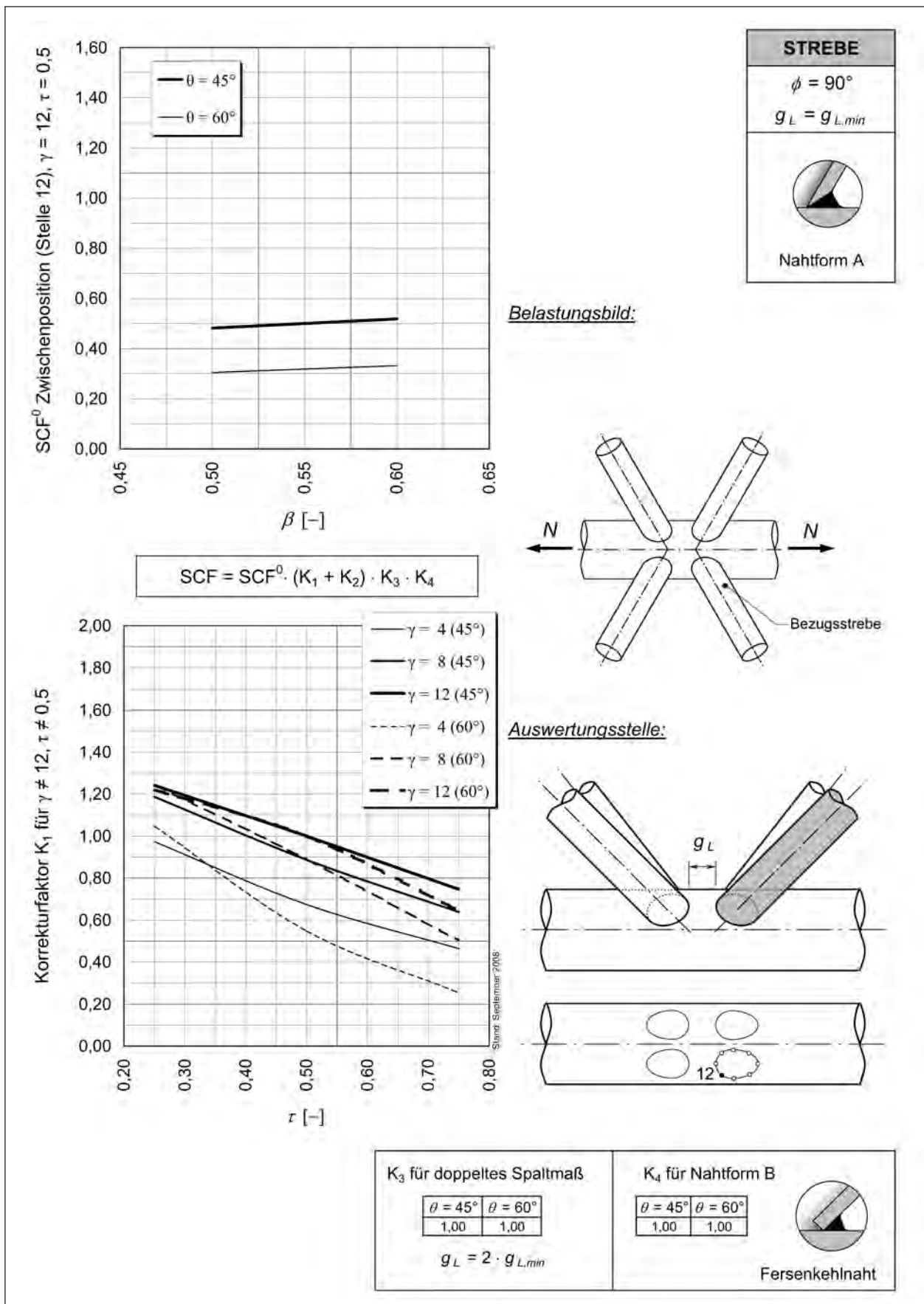


Bild 3-16: SCF<sub>ax, ch</sub> für Lastfall 1 (Gurtnormalkraft), Zwischenposition (12), Strebe

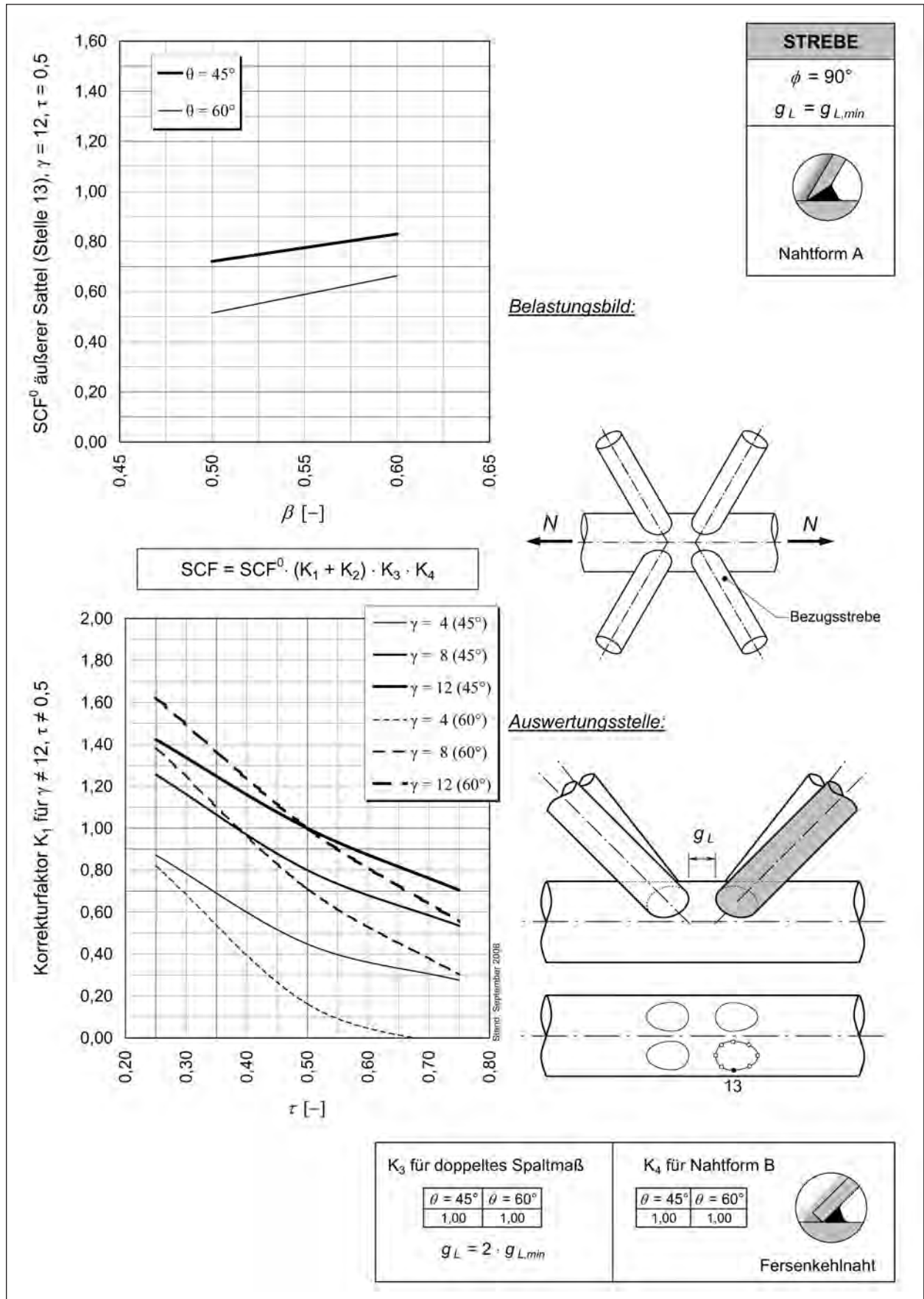


Bild 3-17: SCF<sub>ax, ch</sub> für Lastfall 1 (Gurtnormalkraft), äußerer Sattel (13), Strebe

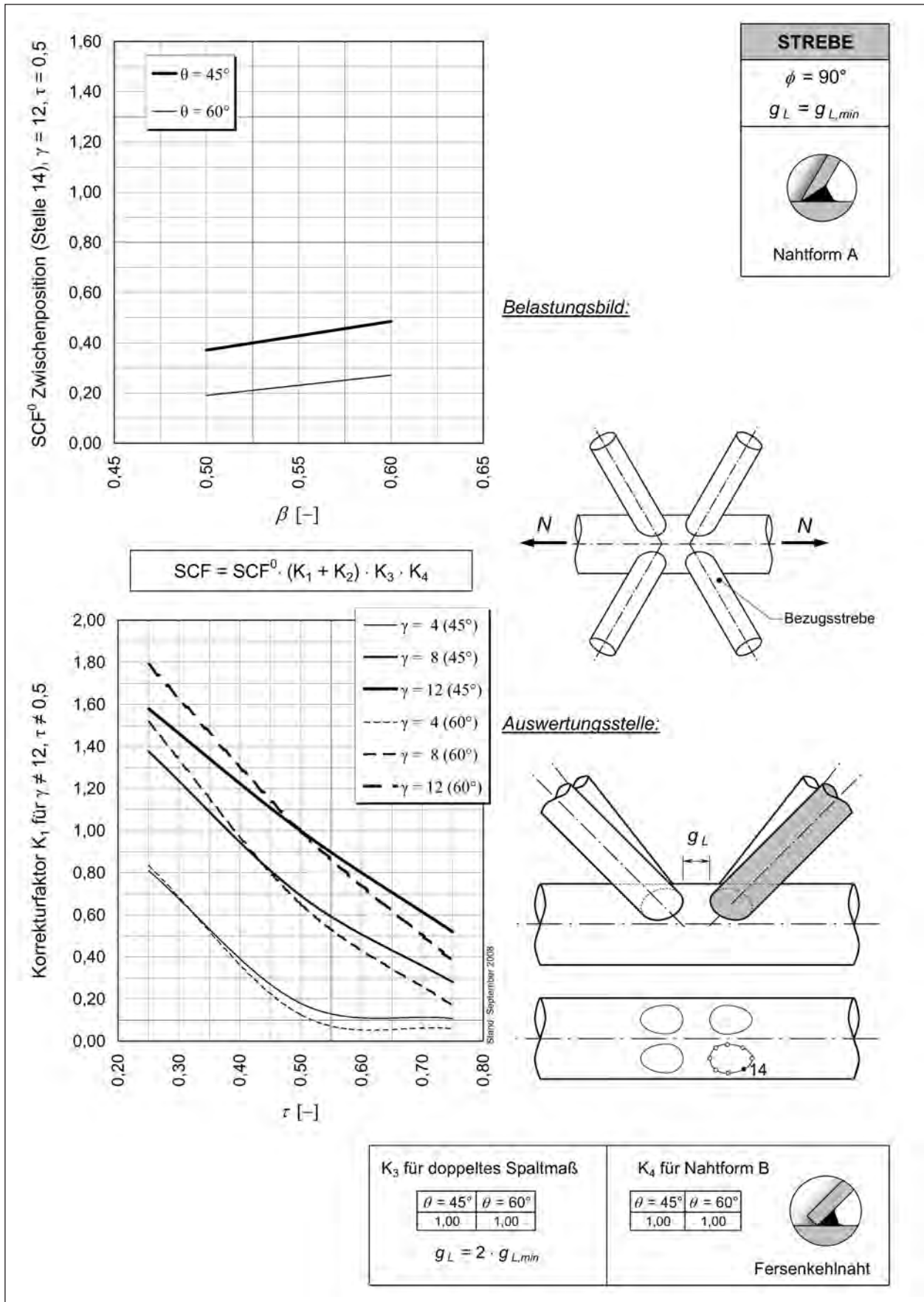


Bild 3-18: SCF<sub>ax, ch</sub> für Lastfall 1 (Gurtnormalkraft), Zwischenposition (14), Strebe

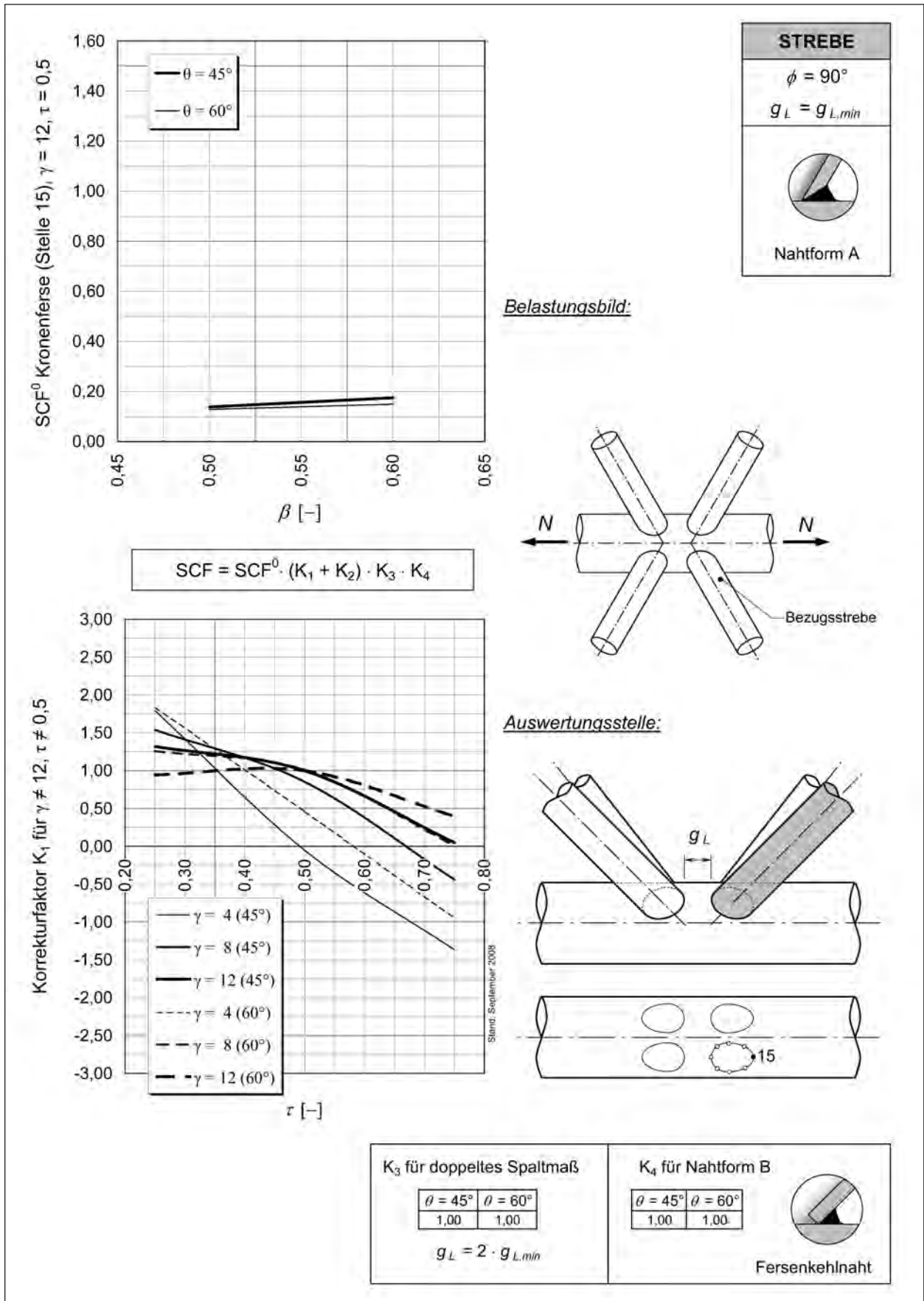


Bild 3-19: SCF<sub>ax, ch</sub> für Lastfall 1 (Gurtnormalkraft), Kronenfese (15), Strebe

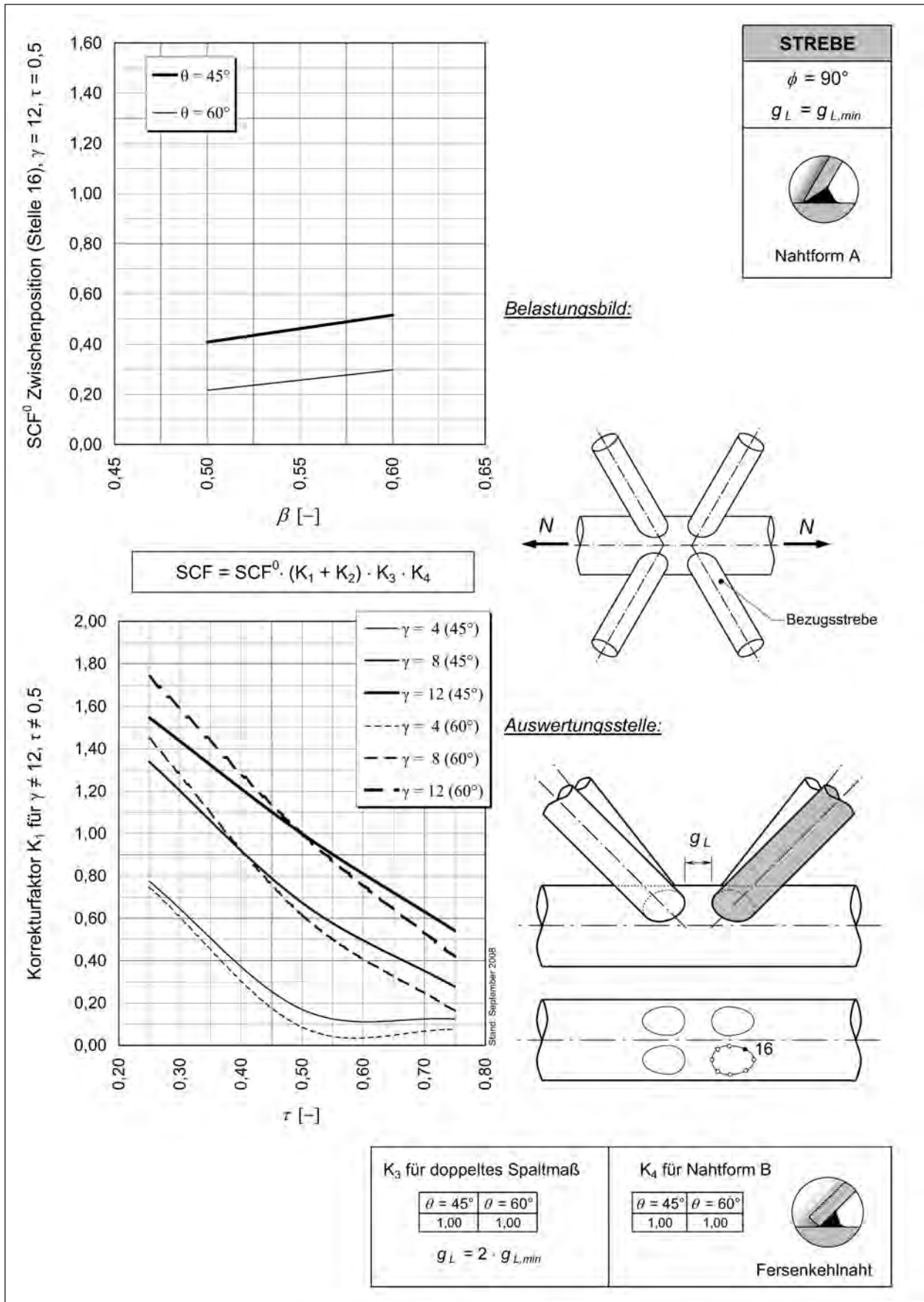


Bild 3-20: SCF<sub>ax, ch</sub> für Lastfall 1 (Gurtnormalkraft), Zwischenposition (16), Strebe



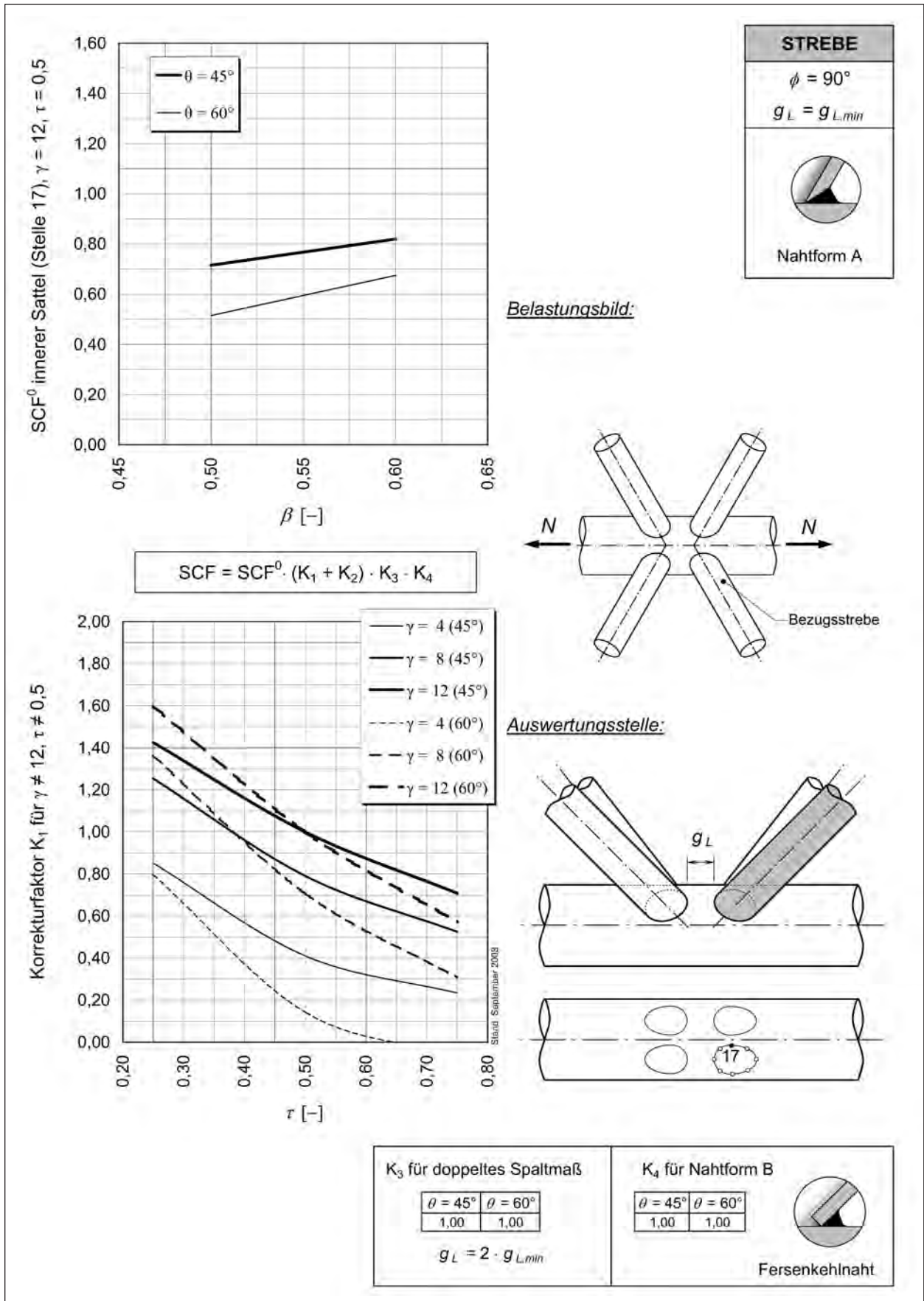


Bild 3-21: SCF<sub>ax, ch</sub> für Lastfall 1 (Gurtnormalkraft), innerer Sattel (17), Strebe

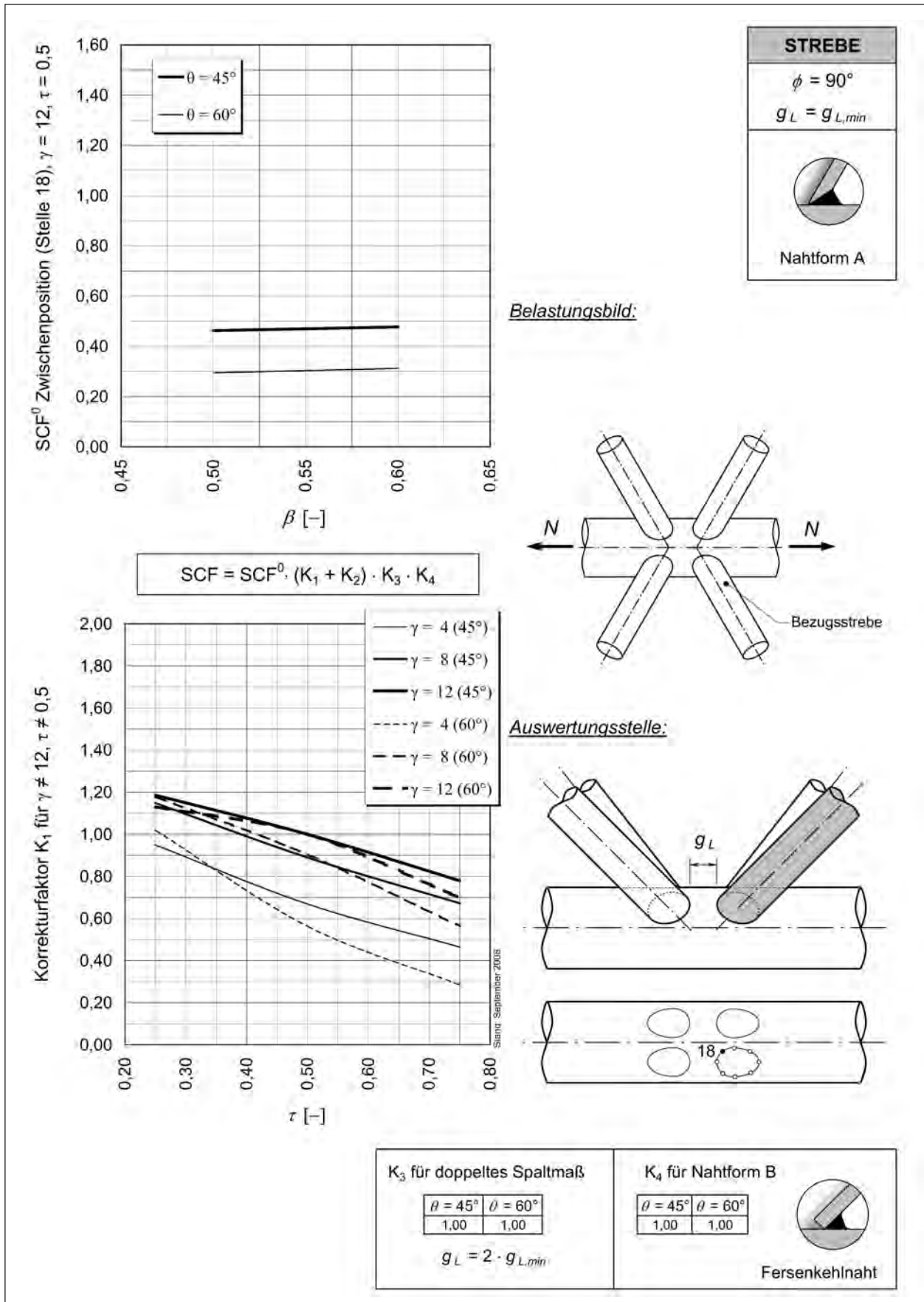


Bild 3-22: SCF<sub>ax, ch</sub> für Lastfall 1 (Gurtnormalkraft), Zwischenposition (18), Strebe

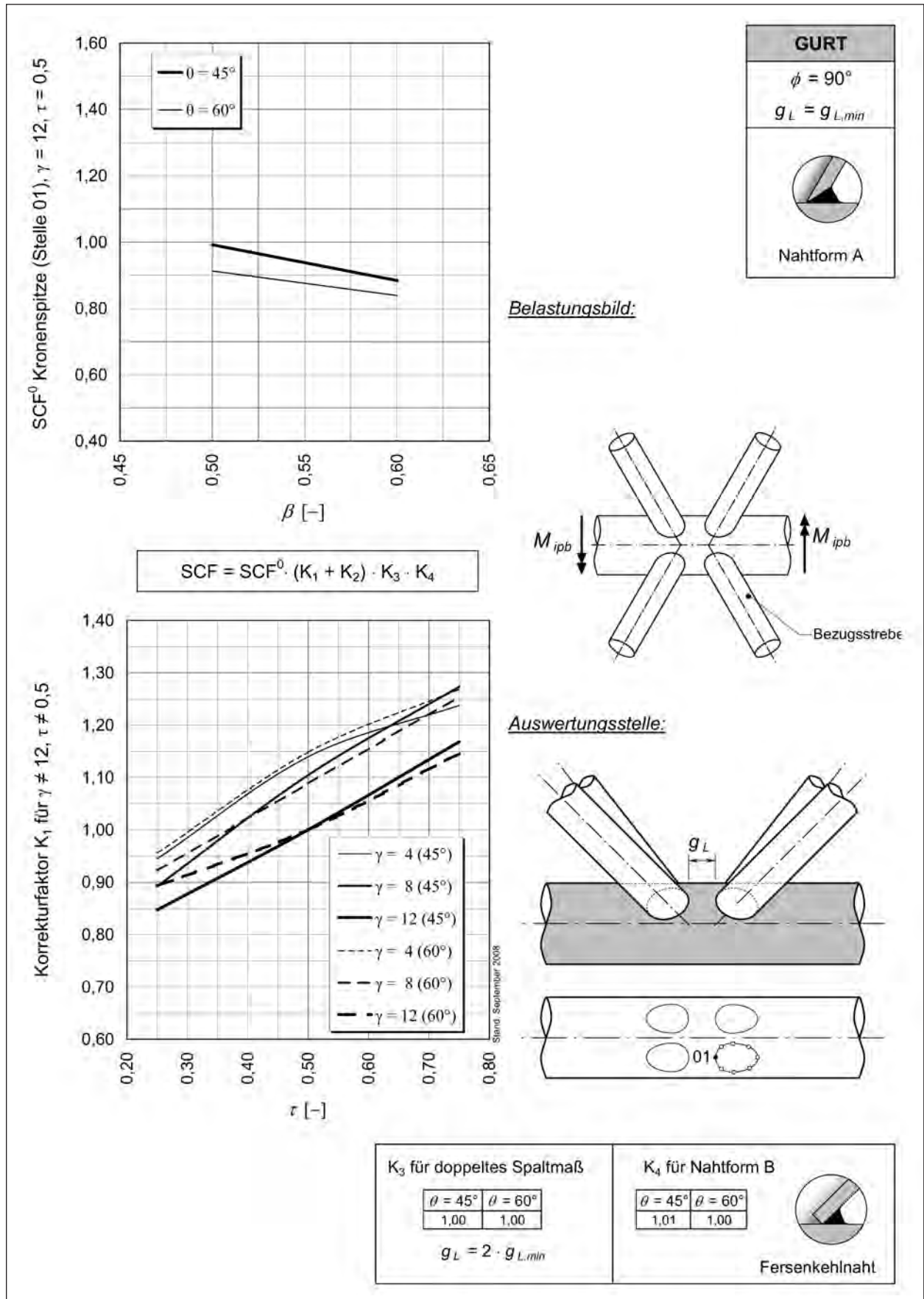


Bild 3-23: SCF<sub>ipb,ch</sub> für Lastfall 2 (Gurtbiegung in der Ebene), Kronenspitze (01), Gurt

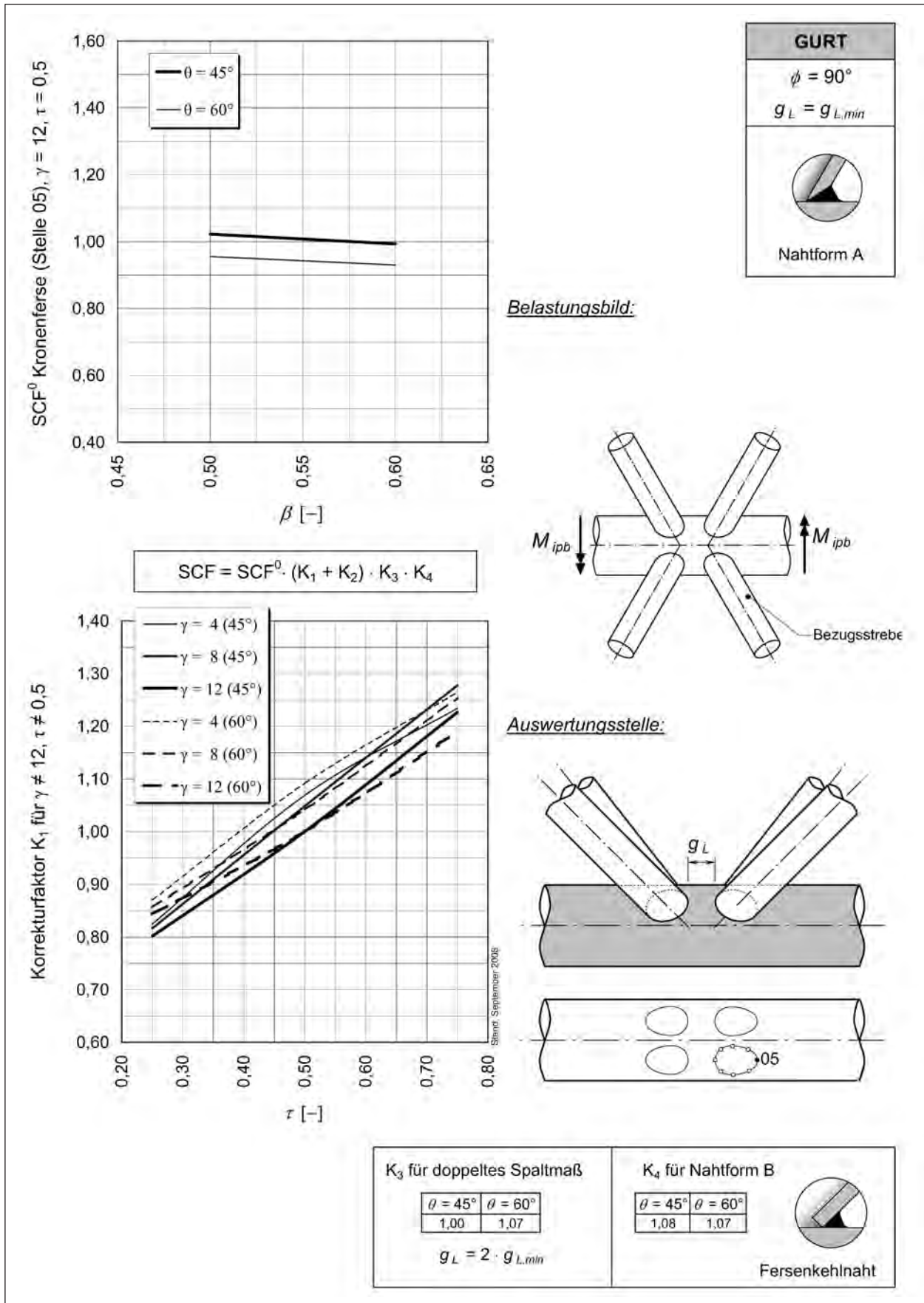


Bild 3-24: SCF<sub>ipb,ch</sub> für Lastfall 2 (Gurtbiegung in der Ebene), Kronenferse (05), Gurt

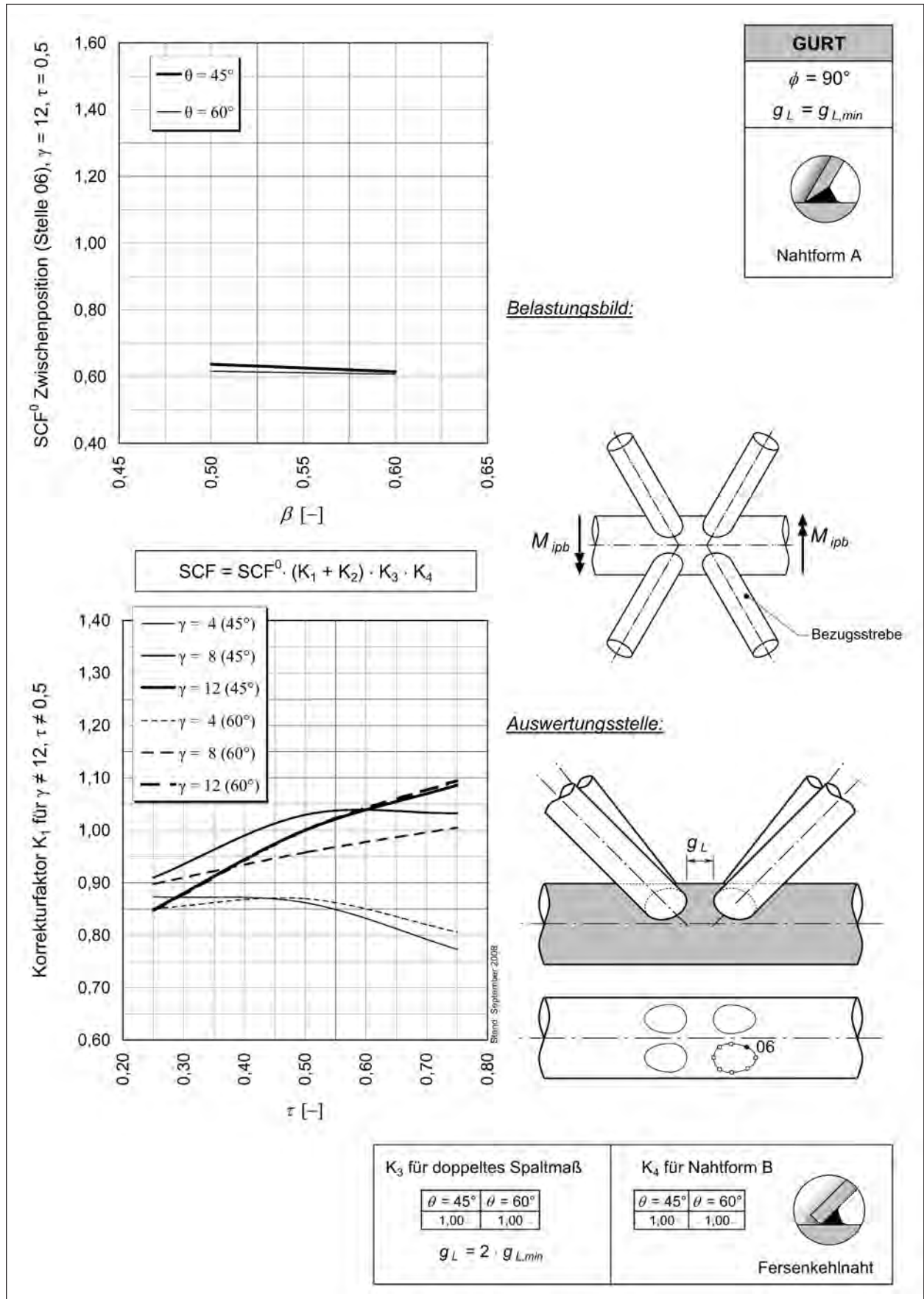


Bild 3-25: SCF<sub>ipb,ch</sub> für Lastfall 2 (Gurtbiegung in der Ebene), Zwischenposition (06), Gurt

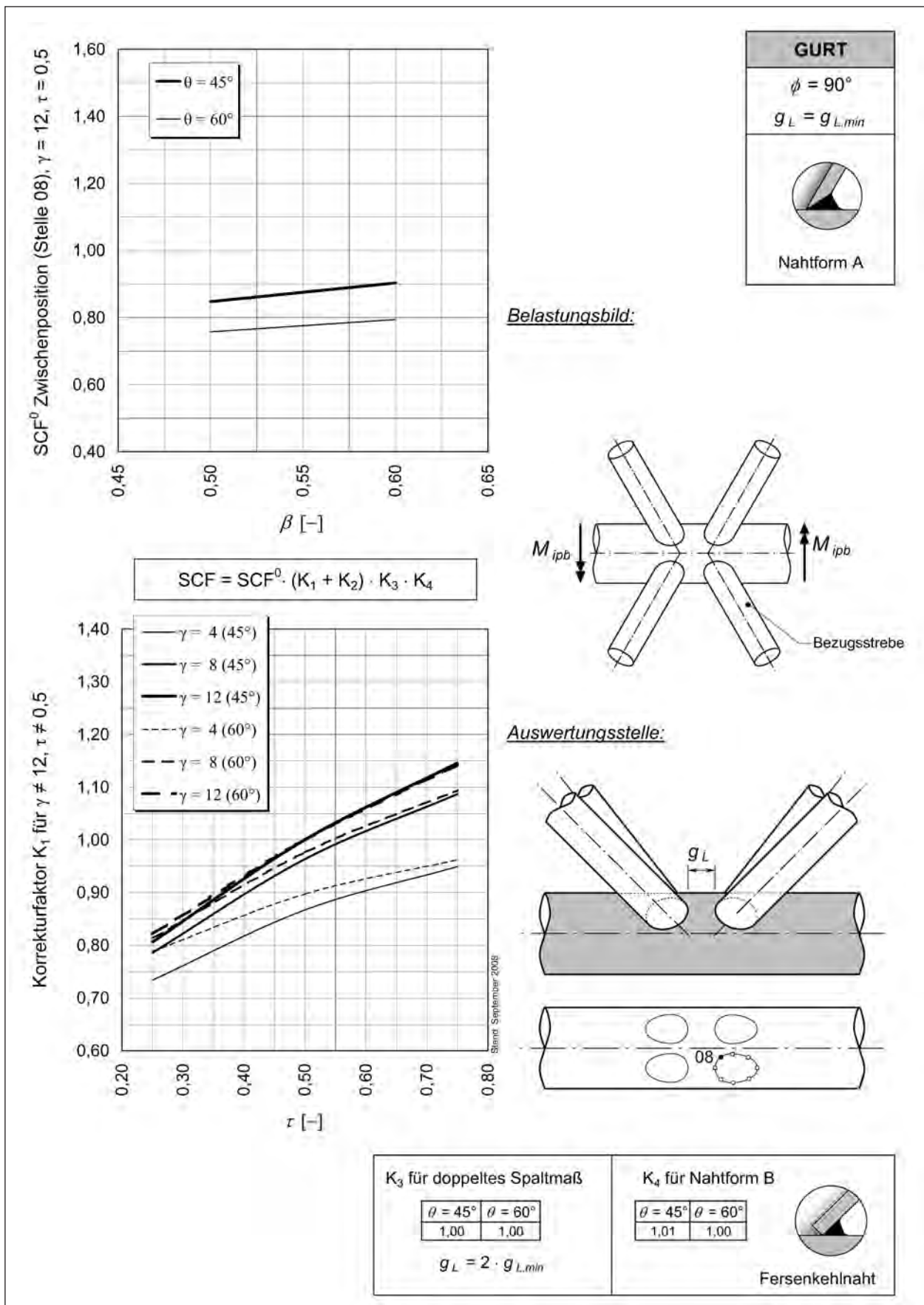


Bild 3-26: SCF<sub>ipb,ch</sub> für Lastfall 2 (Gurtbiegung in der Ebene), Zwischenposition (08), Gurt

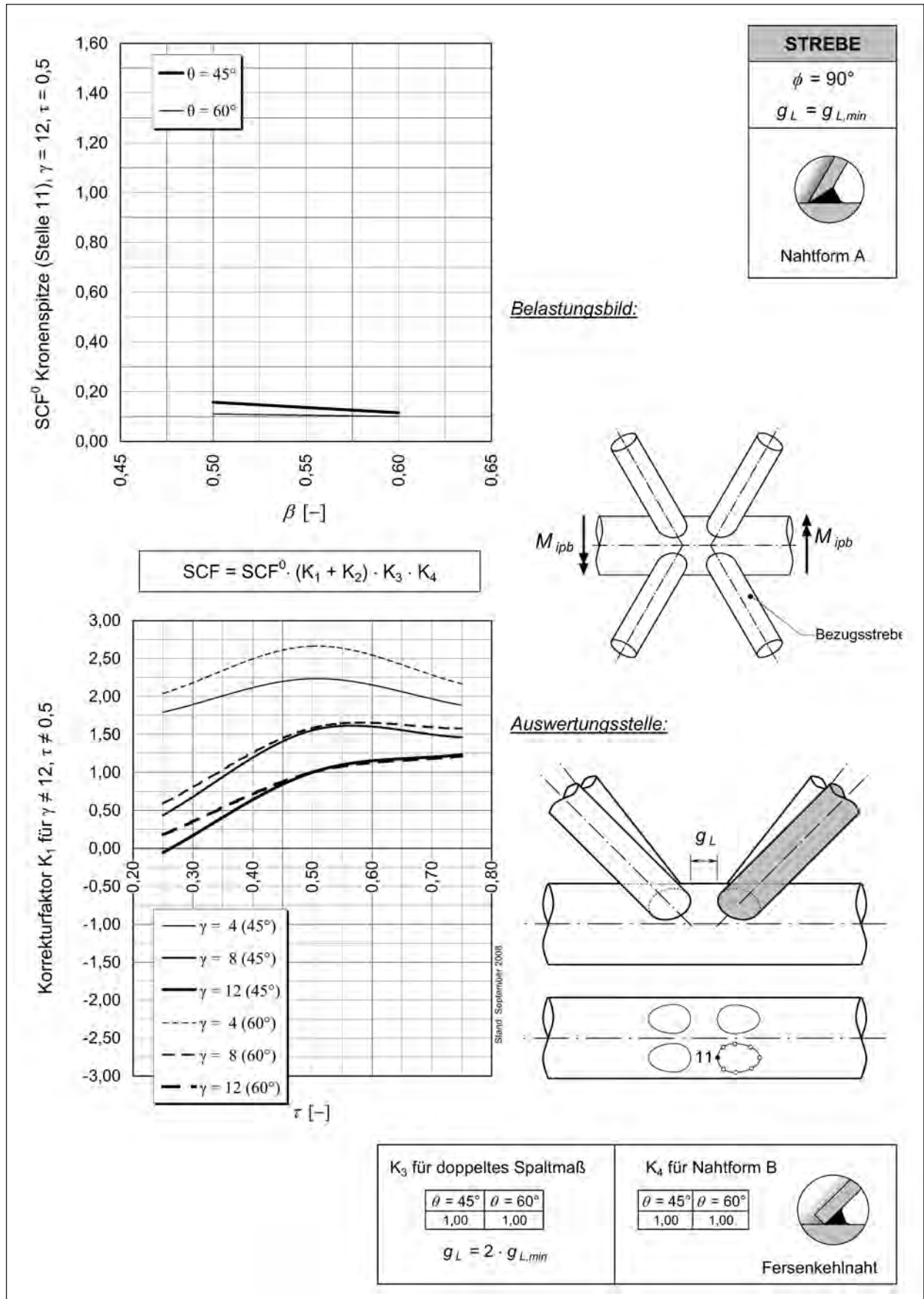


Bild 3-27: SCF<sub>ipb,ch</sub> für Lastfall 2 (Gurtbiegung), Kronenspitze (11), Strebe

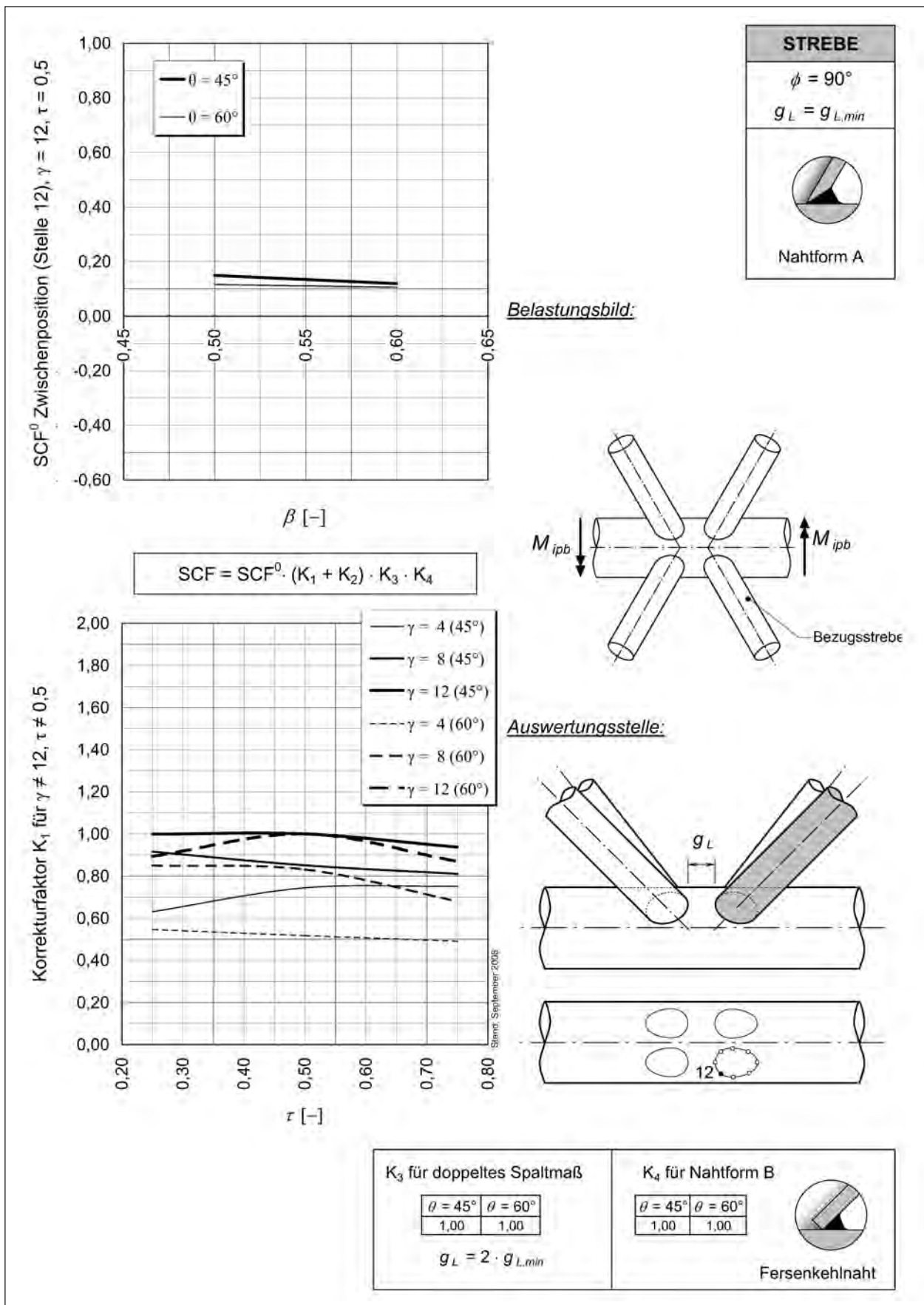
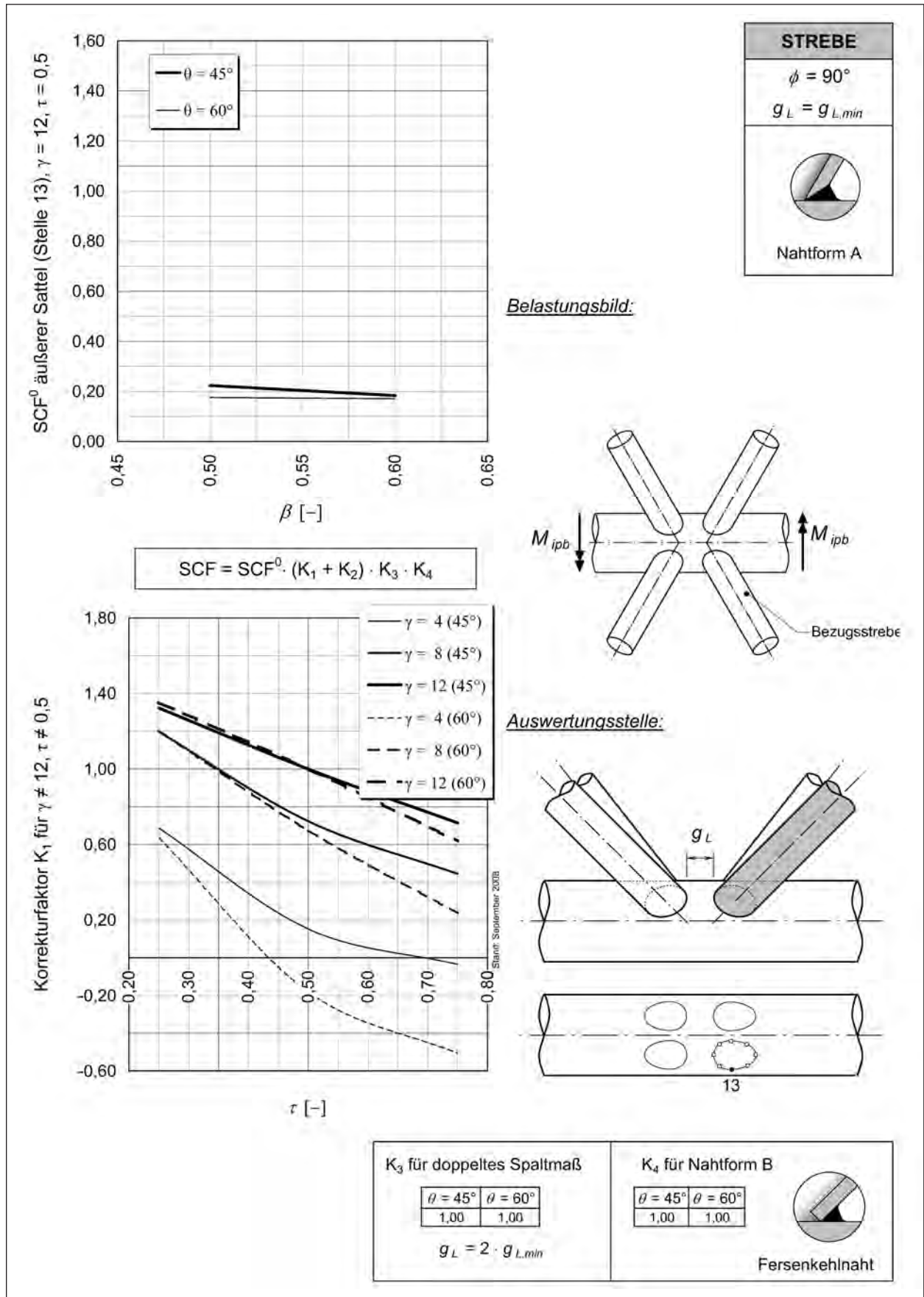


Bild 3-28: SCF<sub>ipb,ch</sub> für Lastfall 2 (Gurtbiegung), Zwischenposition (12), Strebe





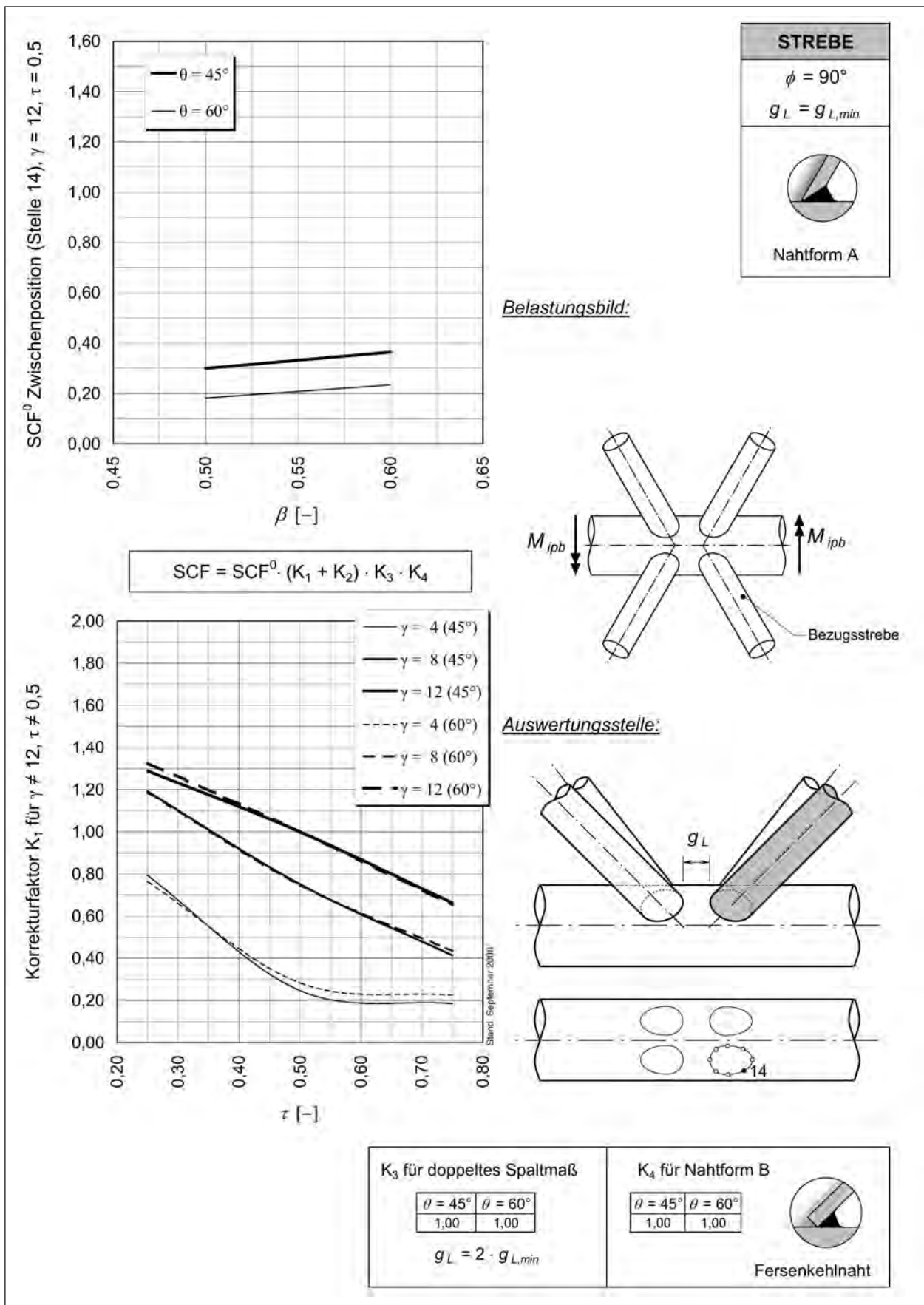


Bild 3-30: SCF<sub>ipb,ch</sub> für Lastfall 2 (Gurtbiegung), Zwischenposition (14), Strebe

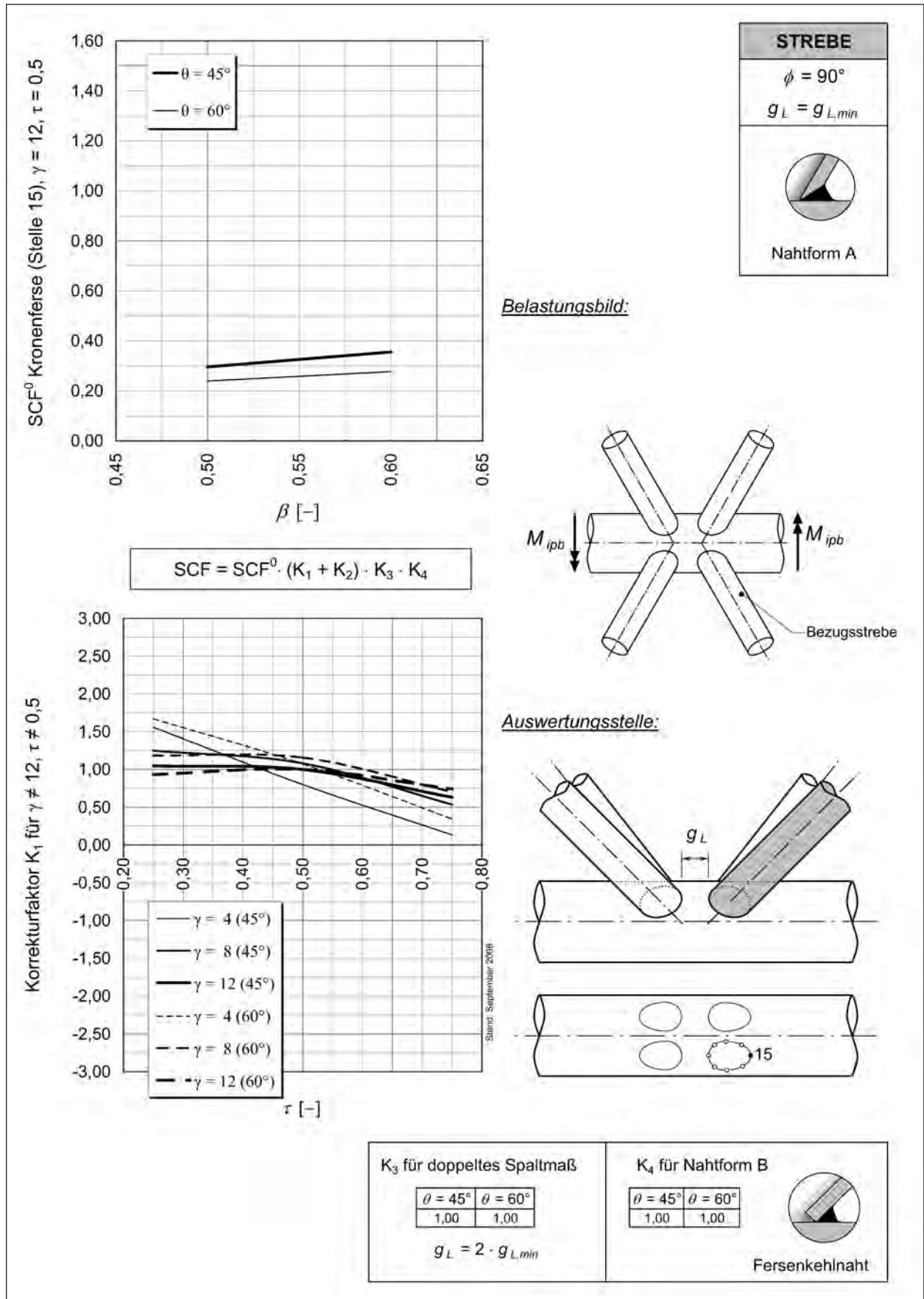


Bild 3-31: SCF<sub>ipb,ch</sub> für Lastfall 2 (Gurtbiegung), Kronenferse (15), Strebe

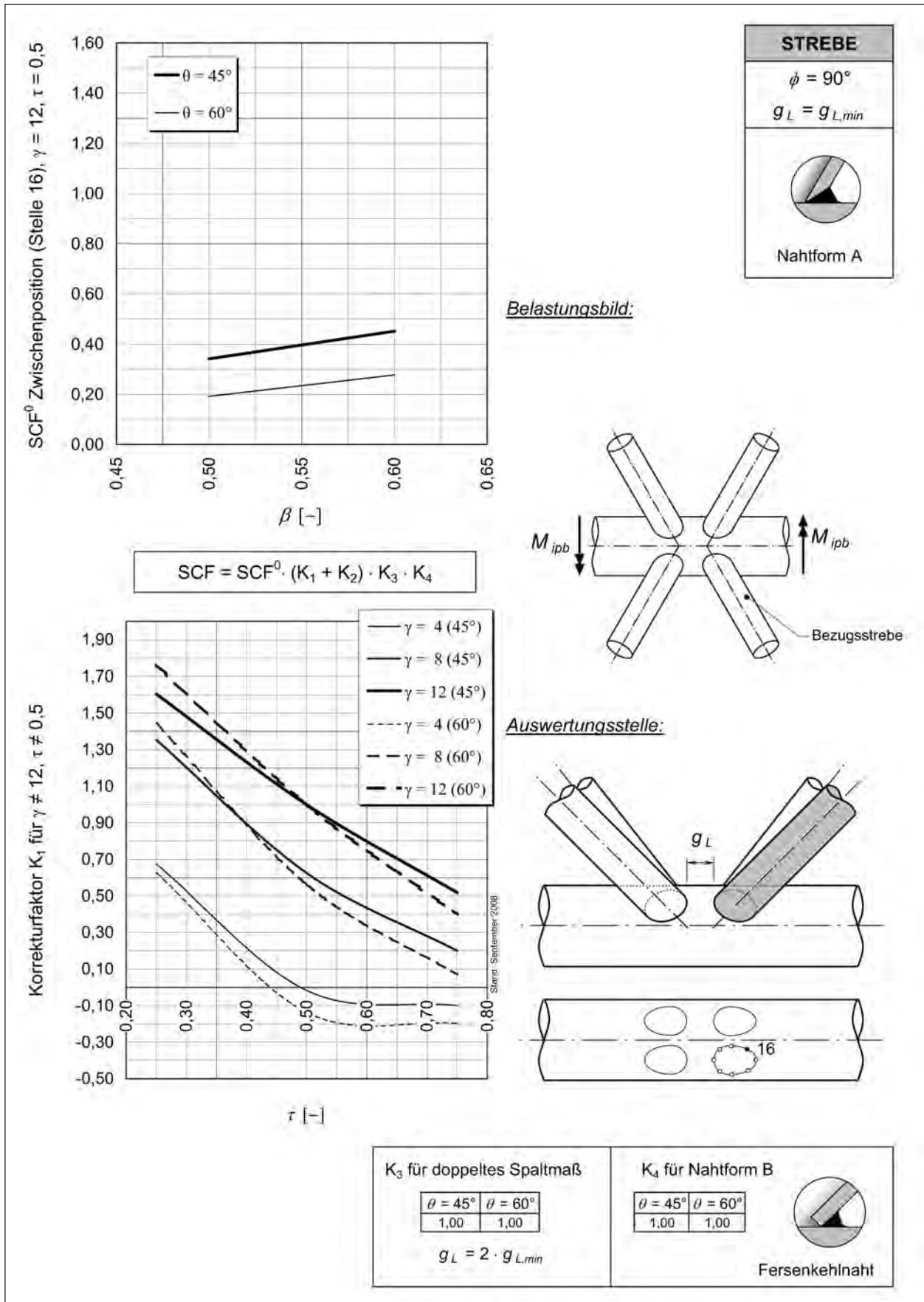


Bild 3-32: SCF<sub>ipb,ch</sub> für Lastfall 2 (Gurtbiegung), Zwischenposition (16), Strebe

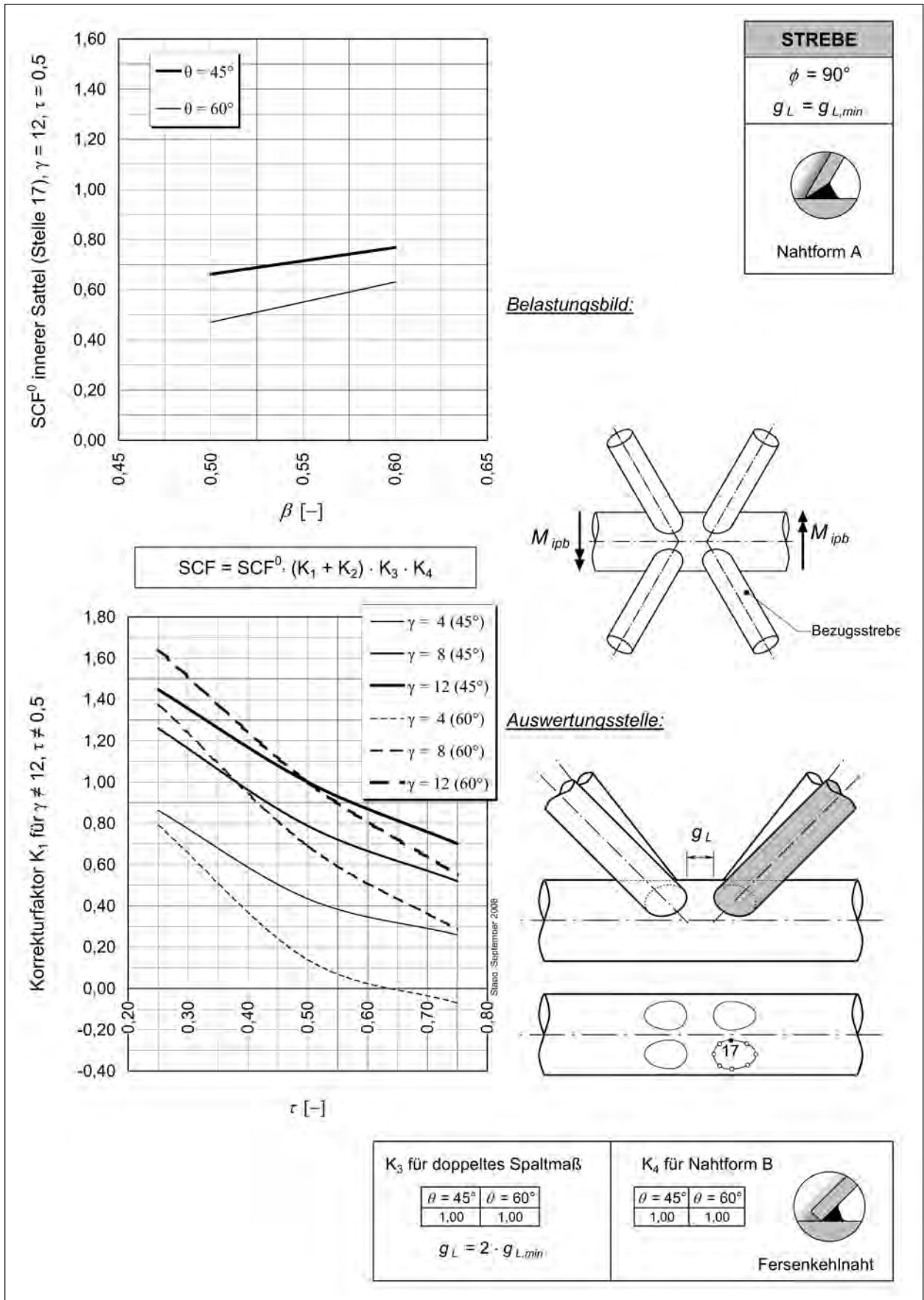


Bild 3-33: SCF<sub>ipb,ch</sub> für Lastfall 2 (Gurtbiegung), innerer Sattel (17), Strebe

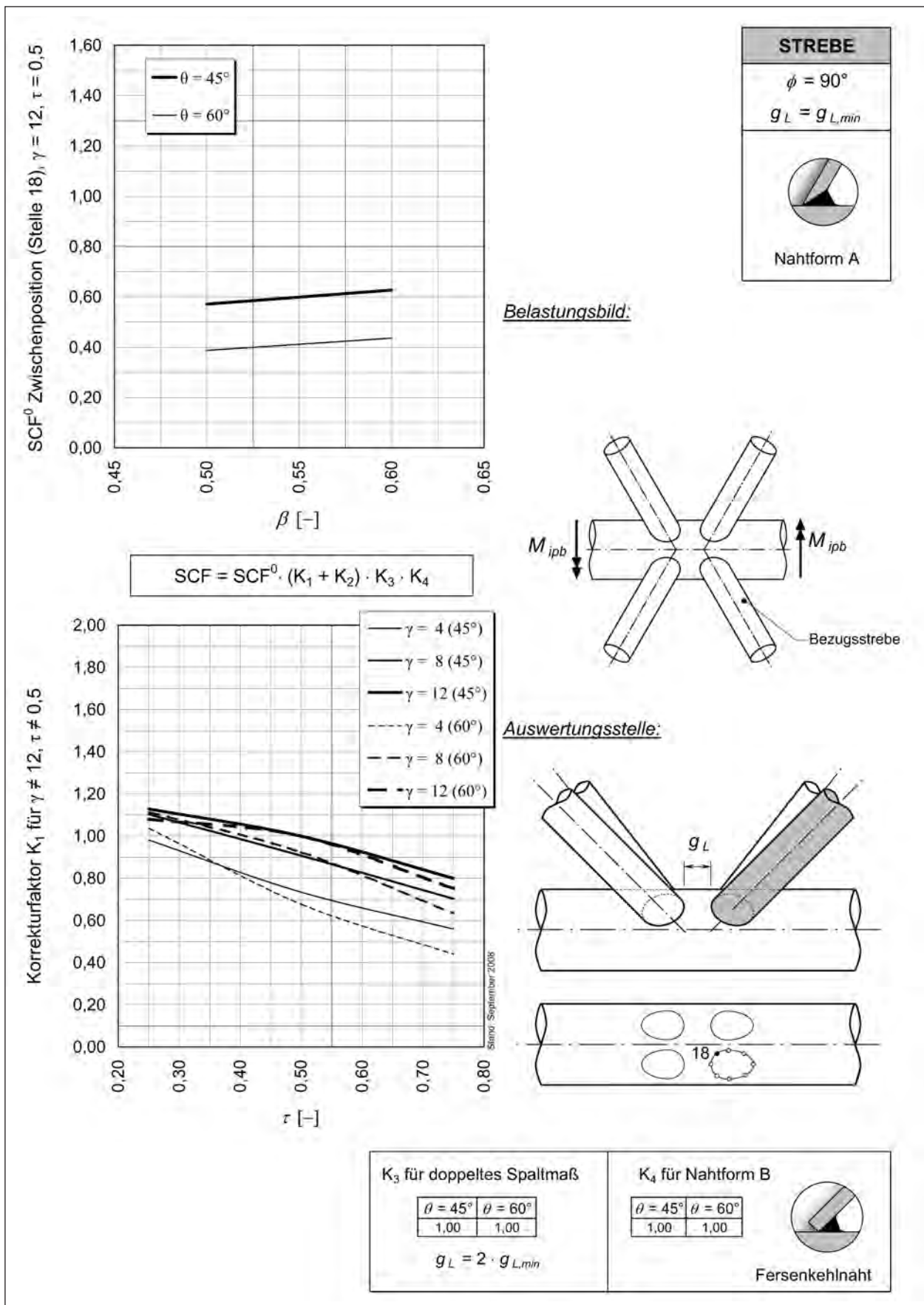


Bild 3-34: SCF<sub>ipb,ch</sub> für Lastfall 2 (Gurtbiegung), Zwischenposition (18), Strebe

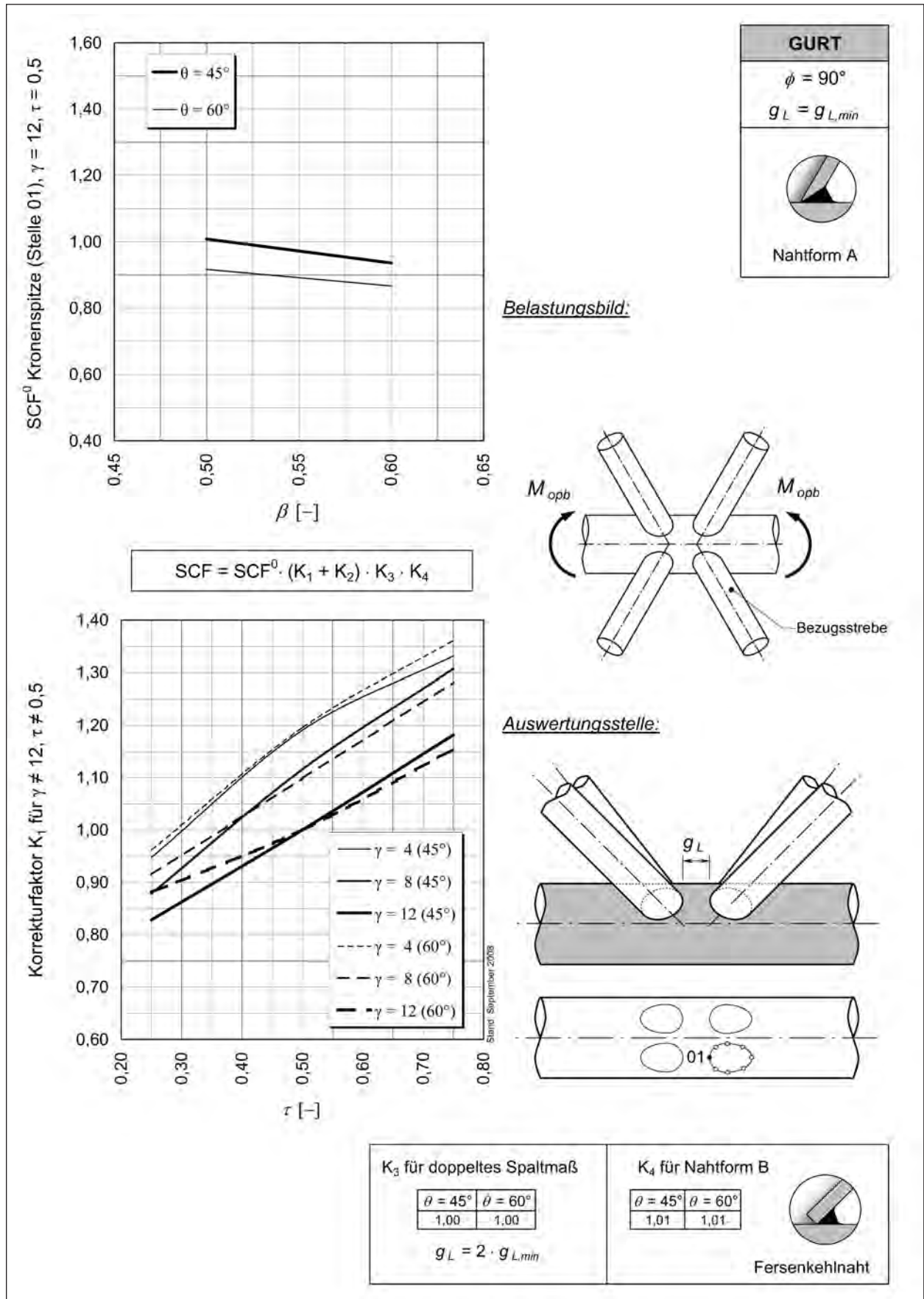


Bild 3-35: SCF<sub>Opb,ch</sub> für Lastfall 3 (Gurtbiegung aus der Ebene), Kronenspitze (01), Gurt

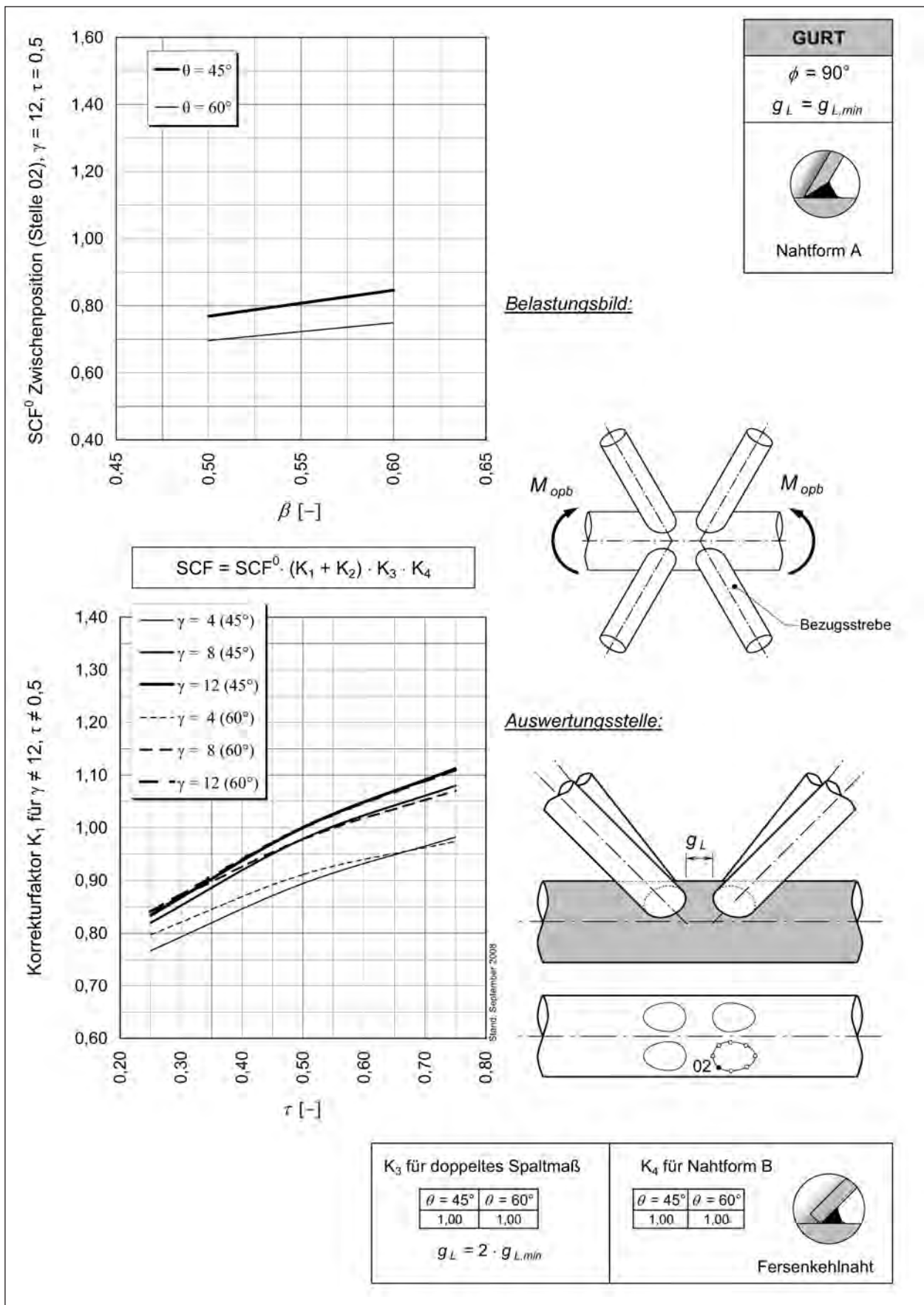


Bild 3-36: SCF<sub>opb,ch</sub> für Lastfall 3 (Gurtbiegung aus der Ebene), Zwischenposition (02), Gurt



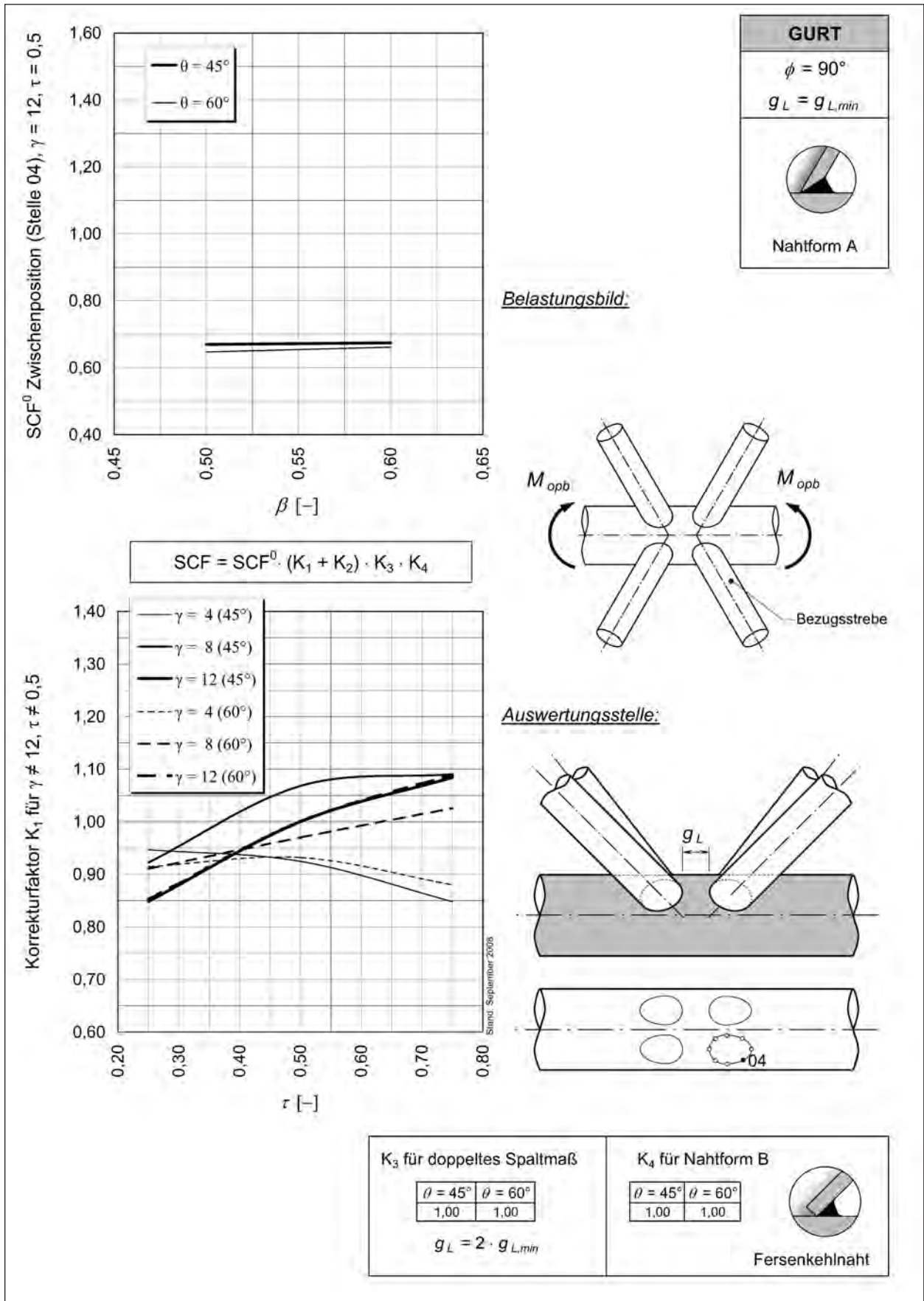
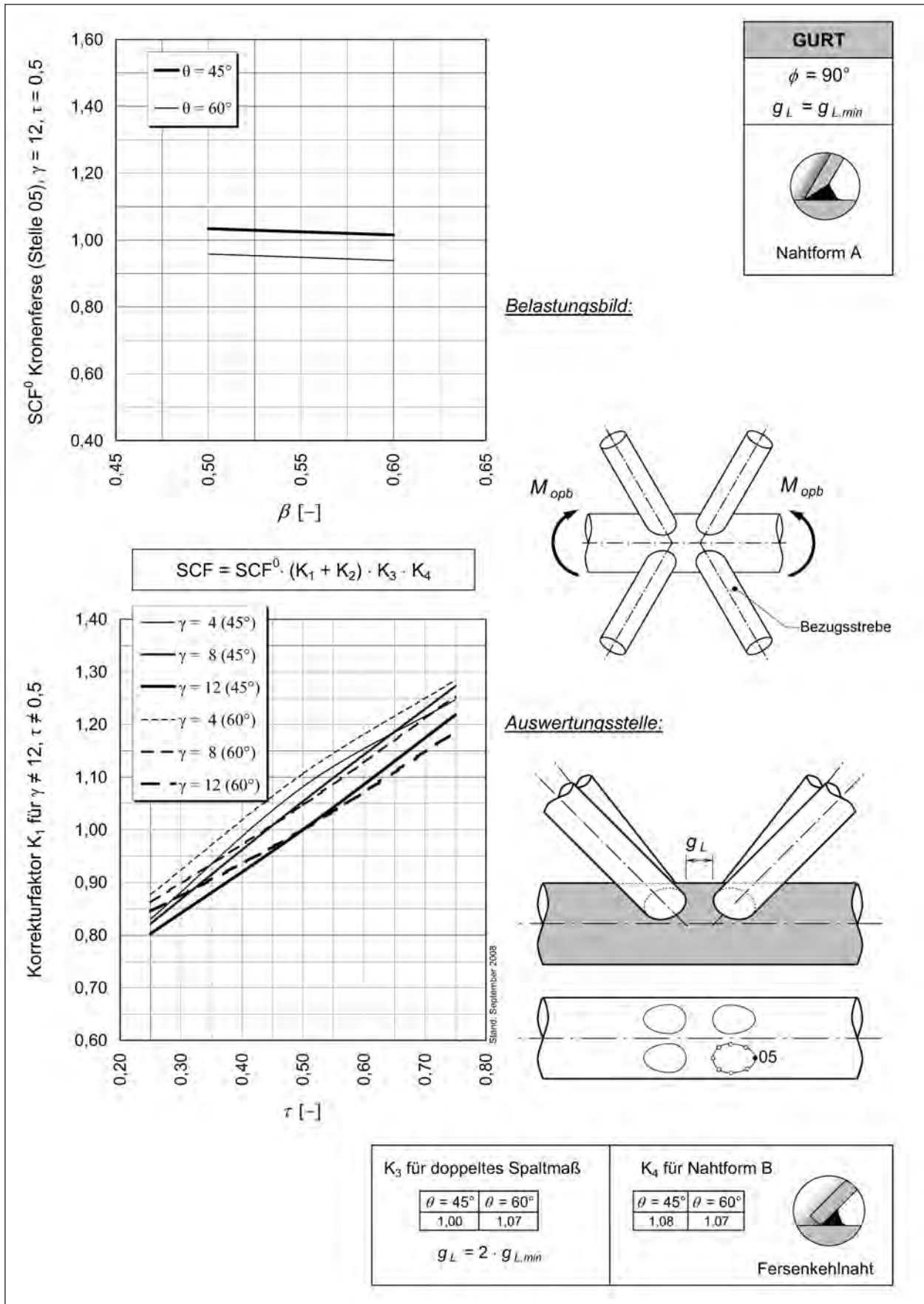


Bild 3-37: SCF<sub>opb,ch</sub> für Lastfall 3 (Gurtbiegung aus der Ebene), Zwischenposition (04), Gurt



**Bild 3-38:** SCF<sub>opb,ch</sub> für Lastfall 3 (Gurtbiegung aus der Ebene), Kronenferse (05), Gurt

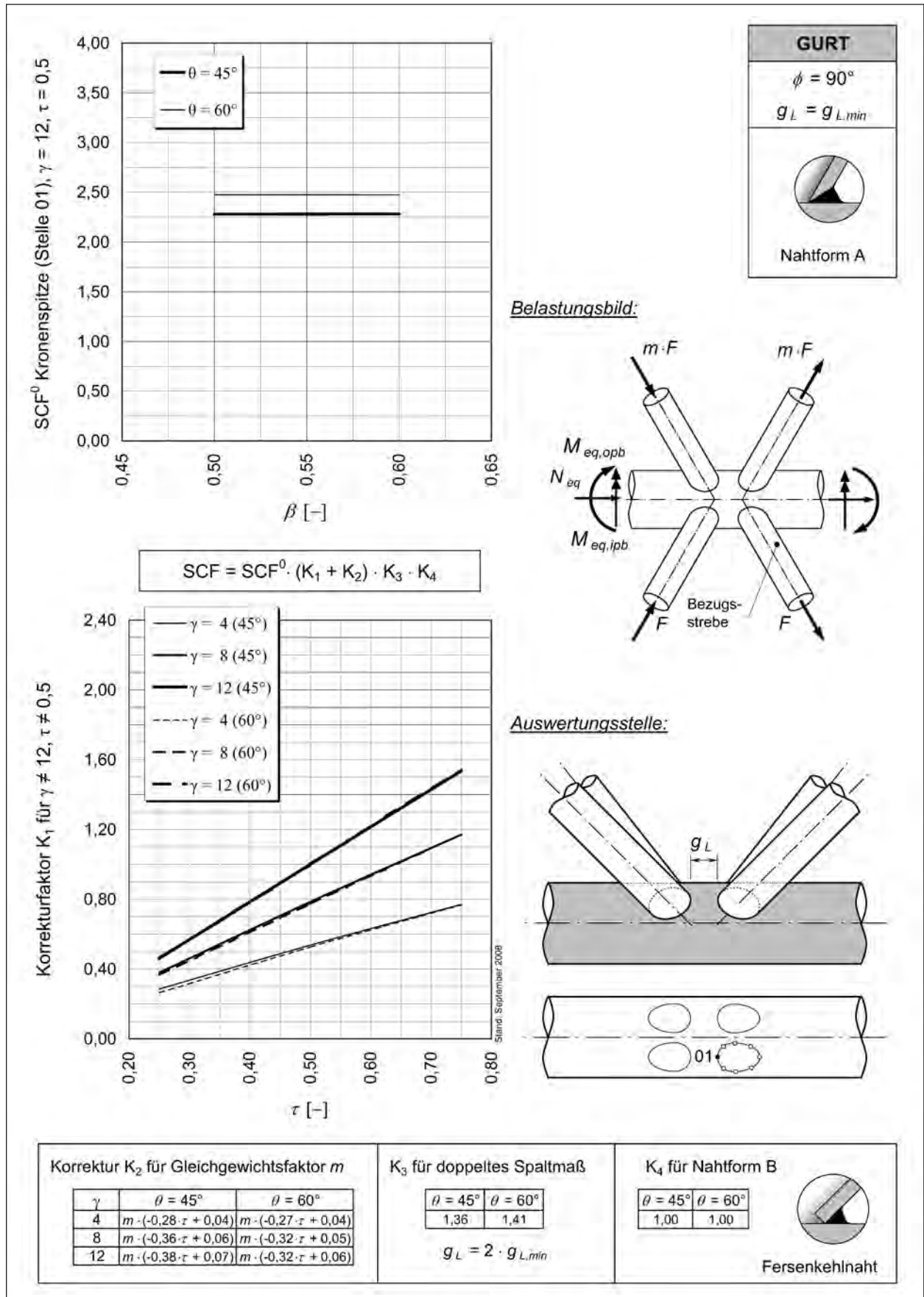


Bild 3-39: SCF<sub>ax,br</sub> für Lastfall 4, 5, 6 (Strebennormalkraft), Kronenspitze (01), Gurt

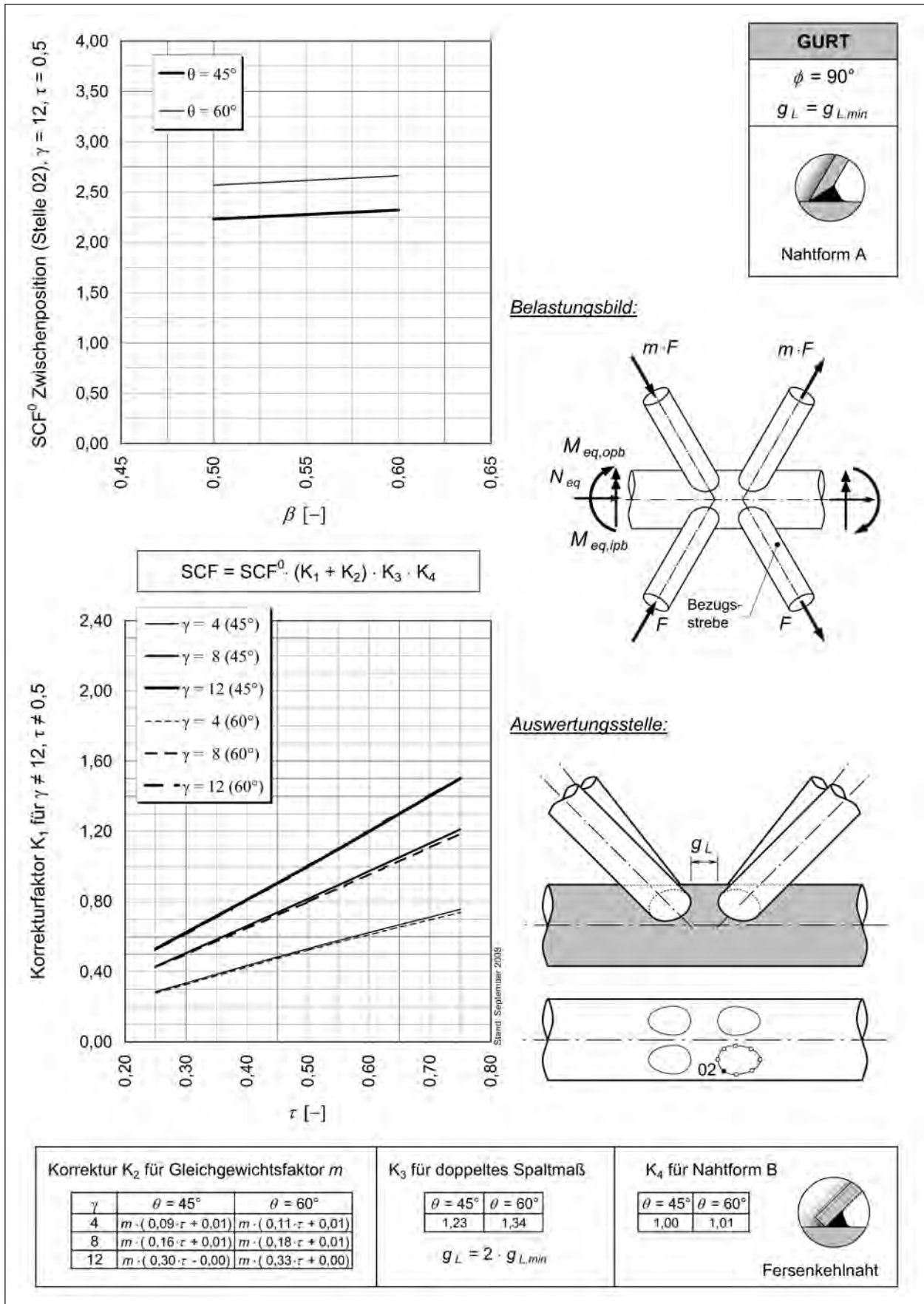
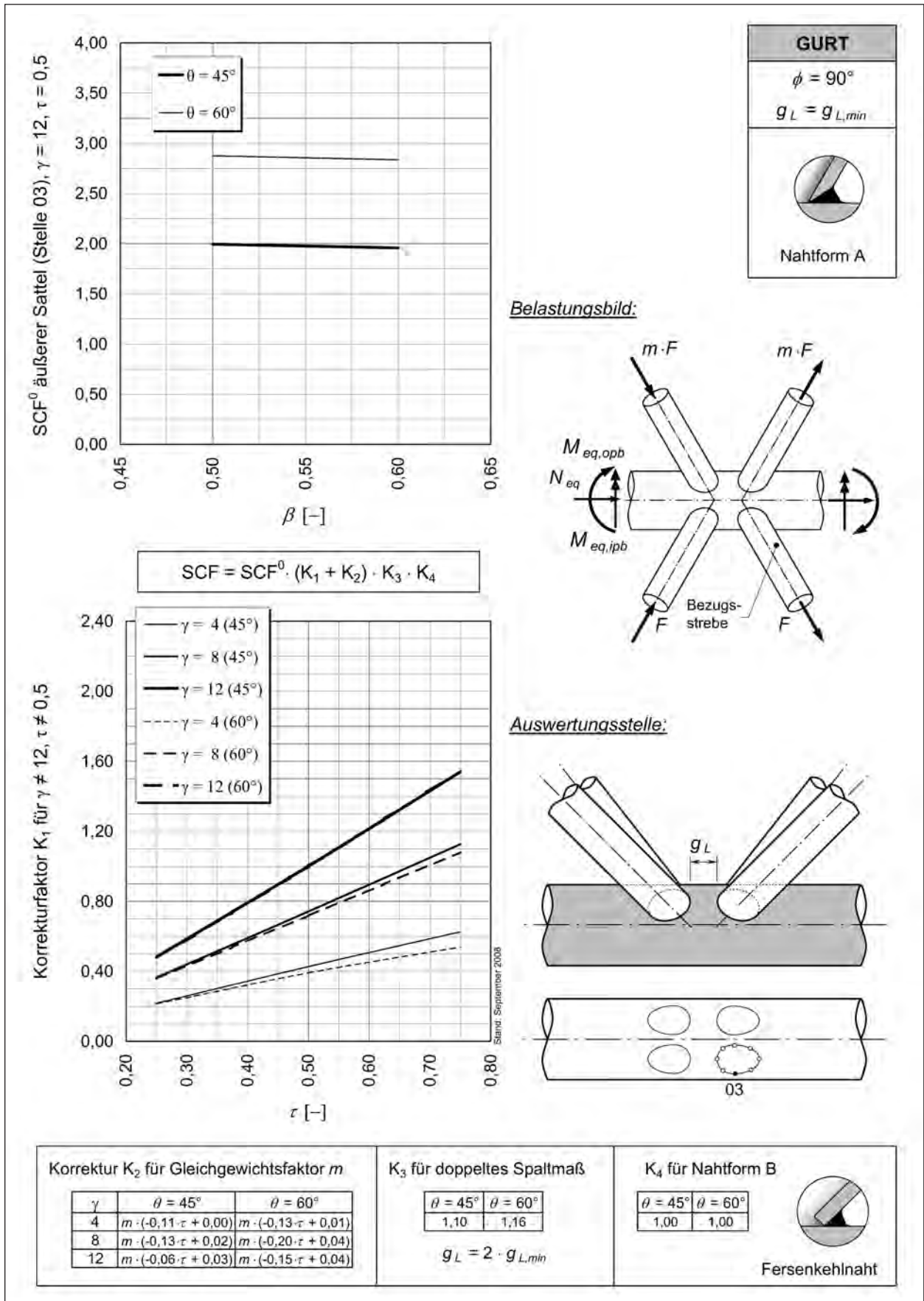


Bild 3-40: SCF<sub>ax,br</sub> für Lastfall 4, 5, 6 (Strebennormalkraft), Zwischenposition (02), Gurt



**SCF = SCF<sup>0</sup> · (K<sub>1</sub> + K<sub>2</sub>) · K<sub>3</sub> · K<sub>4</sub>**

**Korrekturfaktor K<sub>1</sub> für  $\gamma \neq 12, \tau \neq 0,5$**

**Auswertungsstelle:**

**Korrektur K<sub>2</sub> für Gleichgewichtsfaktor m**

$\gamma$	$\theta = 45^\circ$	$\theta = 60^\circ$
4	$m \cdot (-0,11 \cdot \tau + 0,00)$	$m \cdot (-0,13 \cdot \tau + 0,01)$
8	$m \cdot (-0,13 \cdot \tau + 0,02)$	$m \cdot (-0,20 \cdot \tau + 0,04)$
12	$m \cdot (-0,06 \cdot \tau + 0,03)$	$m \cdot (-0,15 \cdot \tau + 0,04)$

**K<sub>3</sub> für doppeltes Spaltmaß**

$\theta = 45^\circ$	$\theta = 60^\circ$
1,10	1,16

$g_L = 2 \cdot g_{L,min}$

**K<sub>4</sub> für Nahtform B**

$\theta = 45^\circ$	$\theta = 60^\circ$
1,00	1,00

Fersenkehlnaht

Bild 3-41: SCF<sub>ax,br</sub> für Lastfall 4, 5, 6 (Strebennormalkraft), äußerer Sattel (03), Gurt

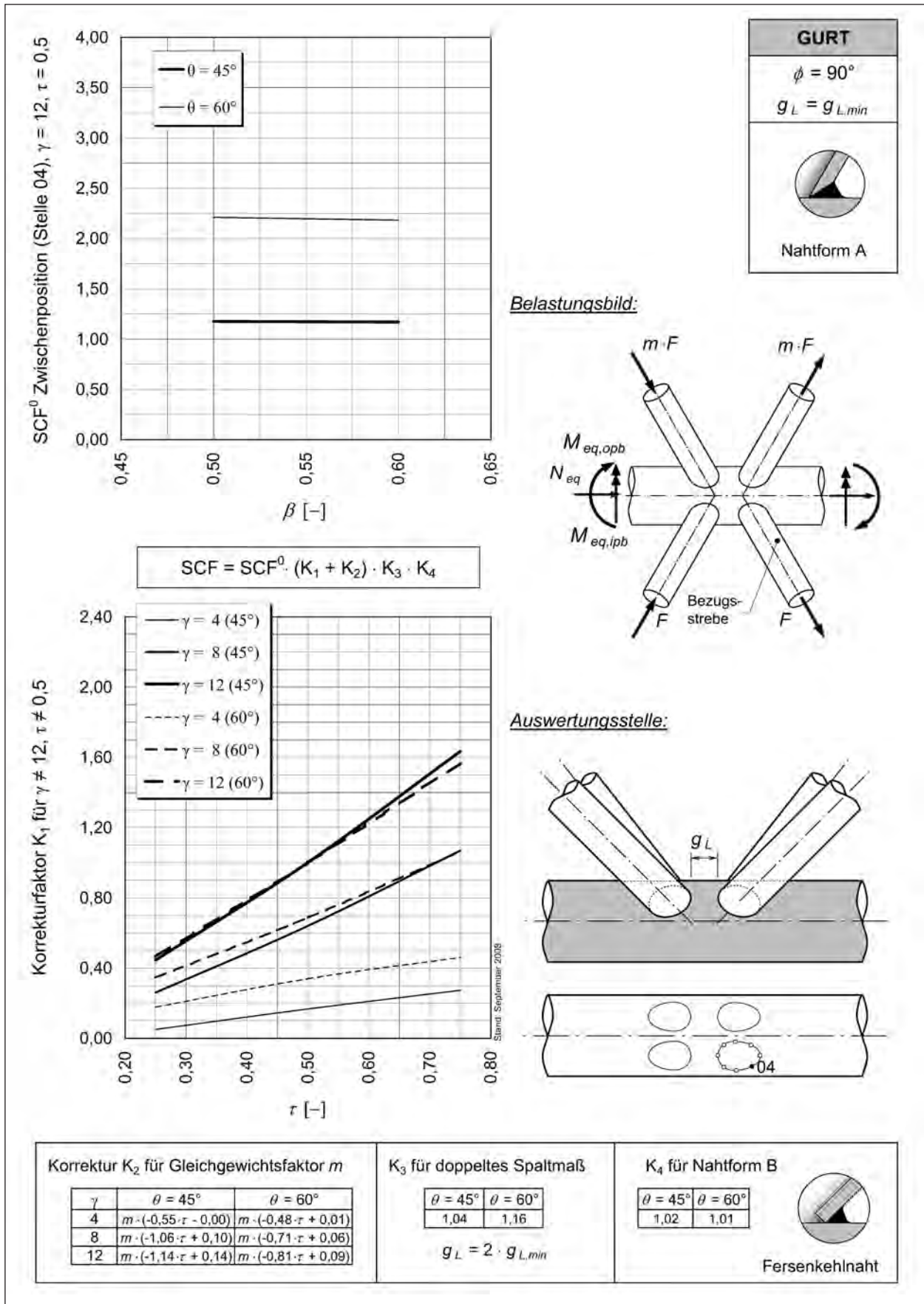


Bild 3-42: SCF<sub>ax,br</sub> für Lastfall 4, 5, 6 (Strebennormalkraft), Zwischenposition (04), Gurt

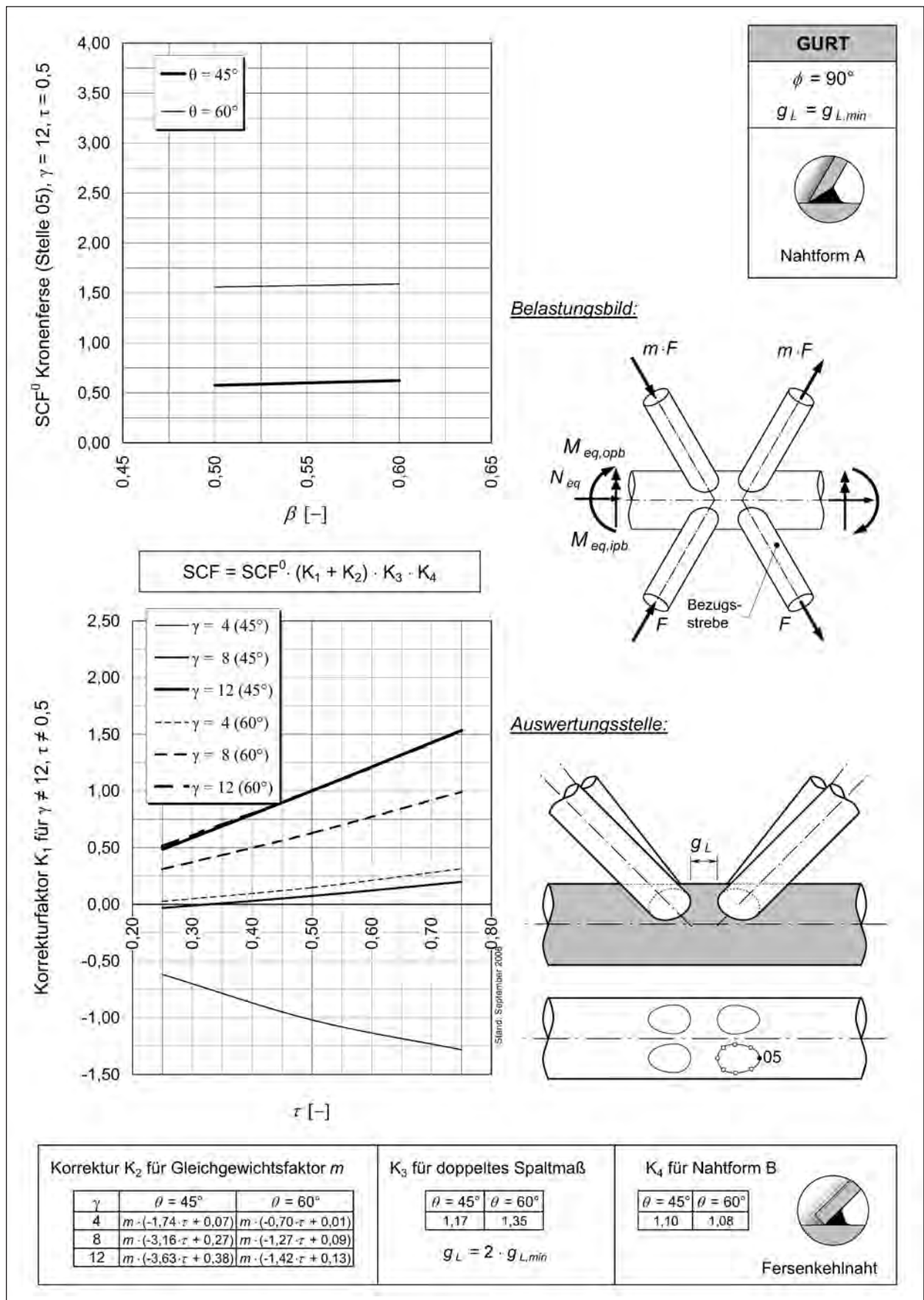


Bild 3-43: SCF<sub>ax,br</sub> für Lastfall 4, 5, 6 (Strebennormalkraft), Kronenferse (05), Gurt

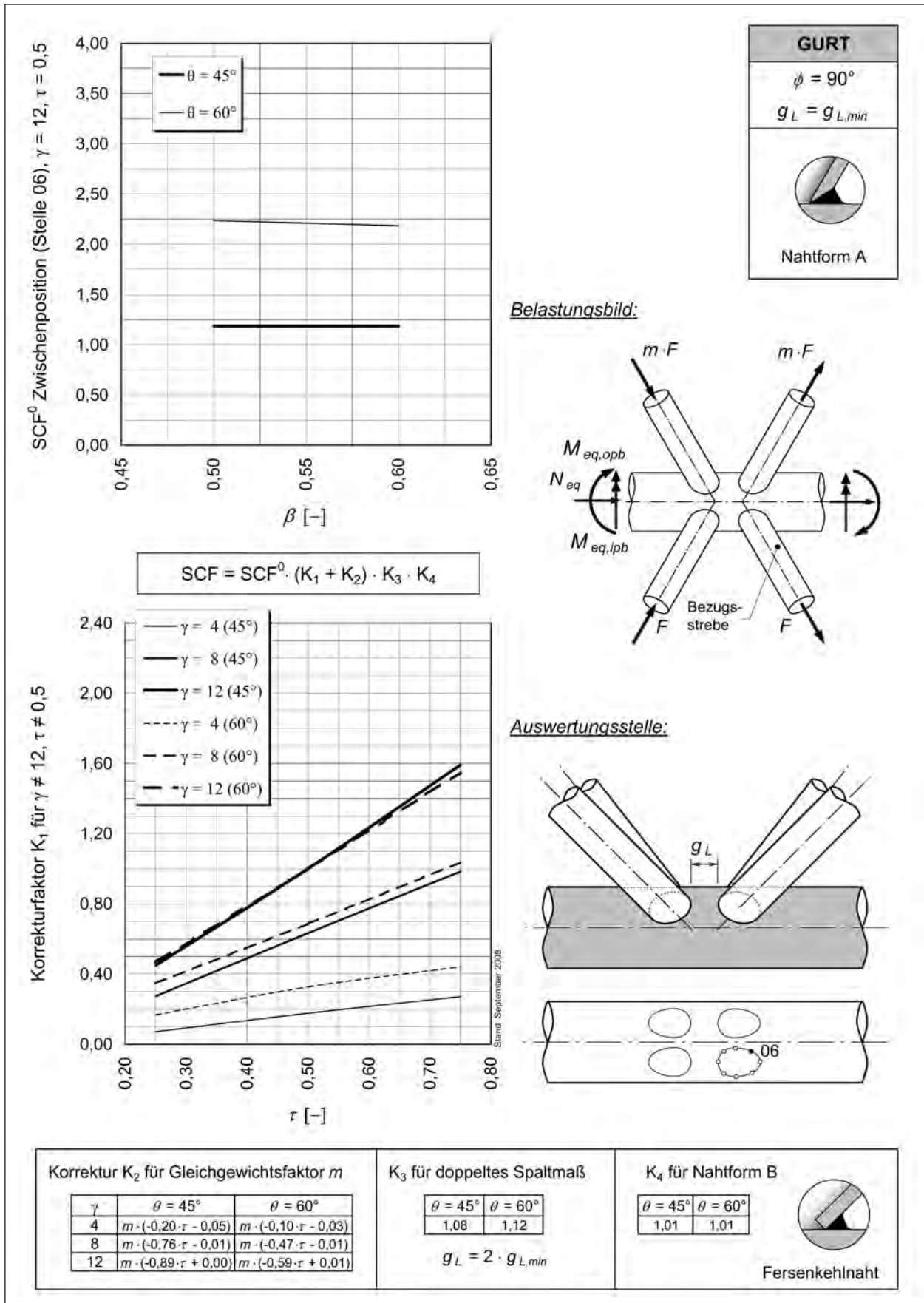
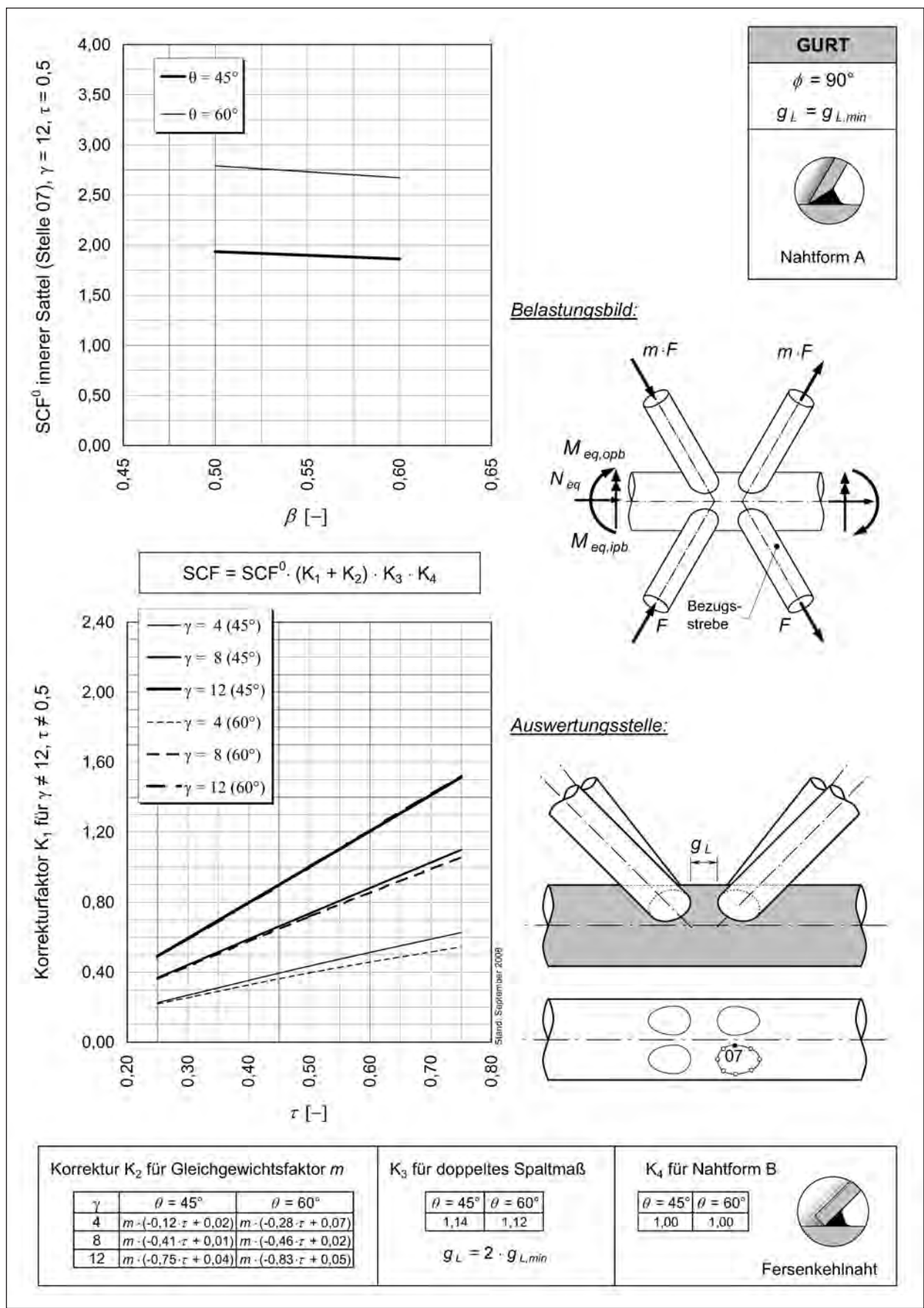


Bild 3-44: SCF<sub>ax,br</sub> für Lastfall 4, 5, 6 (Strebennormalkraft), Zwischenposition (06), Gurt





$SCF = SCF^0 \cdot (K_1 + K_2) \cdot K_3 \cdot K_4$

**Korrekturfaktor K<sub>1</sub> für  $\gamma \neq 12, \tau \neq 0,5$**

**Auswertungsstelle:**

**Korrektur K<sub>2</sub> für Gleichgewichtsfaktor m**

$\gamma$	$\theta = 45^\circ$	$\theta = 60^\circ$
4	$m \cdot (-0,12 \cdot \tau + 0,02)$	$m \cdot (-0,28 \cdot \tau + 0,07)$
8	$m \cdot (-0,41 \cdot \tau + 0,01)$	$m \cdot (-0,46 \cdot \tau + 0,02)$
12	$m \cdot (-0,75 \cdot \tau + 0,04)$	$m \cdot (-0,83 \cdot \tau + 0,05)$

**K<sub>3</sub> für doppeltes Spaltmaß**

$\theta = 45^\circ$	$\theta = 60^\circ$
1,14	1,12

$g_L = 2 \cdot g_{L,min}$

**K<sub>4</sub> für Nahtform B**

$\theta = 45^\circ$	$\theta = 60^\circ$
1,00	1,00

Fersennehnnaht

Bild 3-45: SCF<sub>ax,br</sub> für Lastfall 4, 5, 6 (Strebennormalkraft), innerer Sattel (07), Gurt

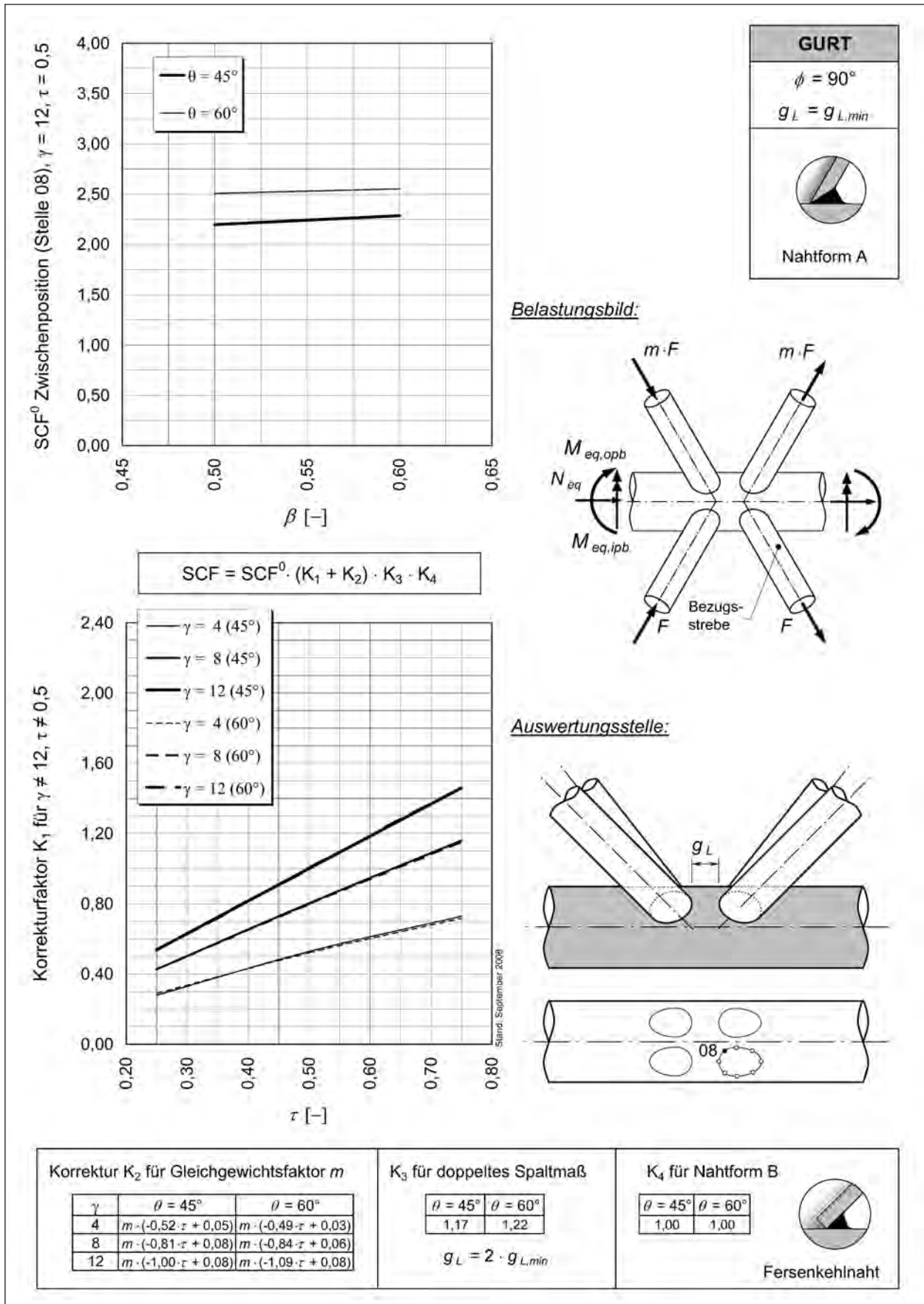


Bild 3-46: SCF<sub>ax,br</sub> für Lastfall 4, 5, 6 (Strebennormalkraft), Zwischenposition (08), Gurt

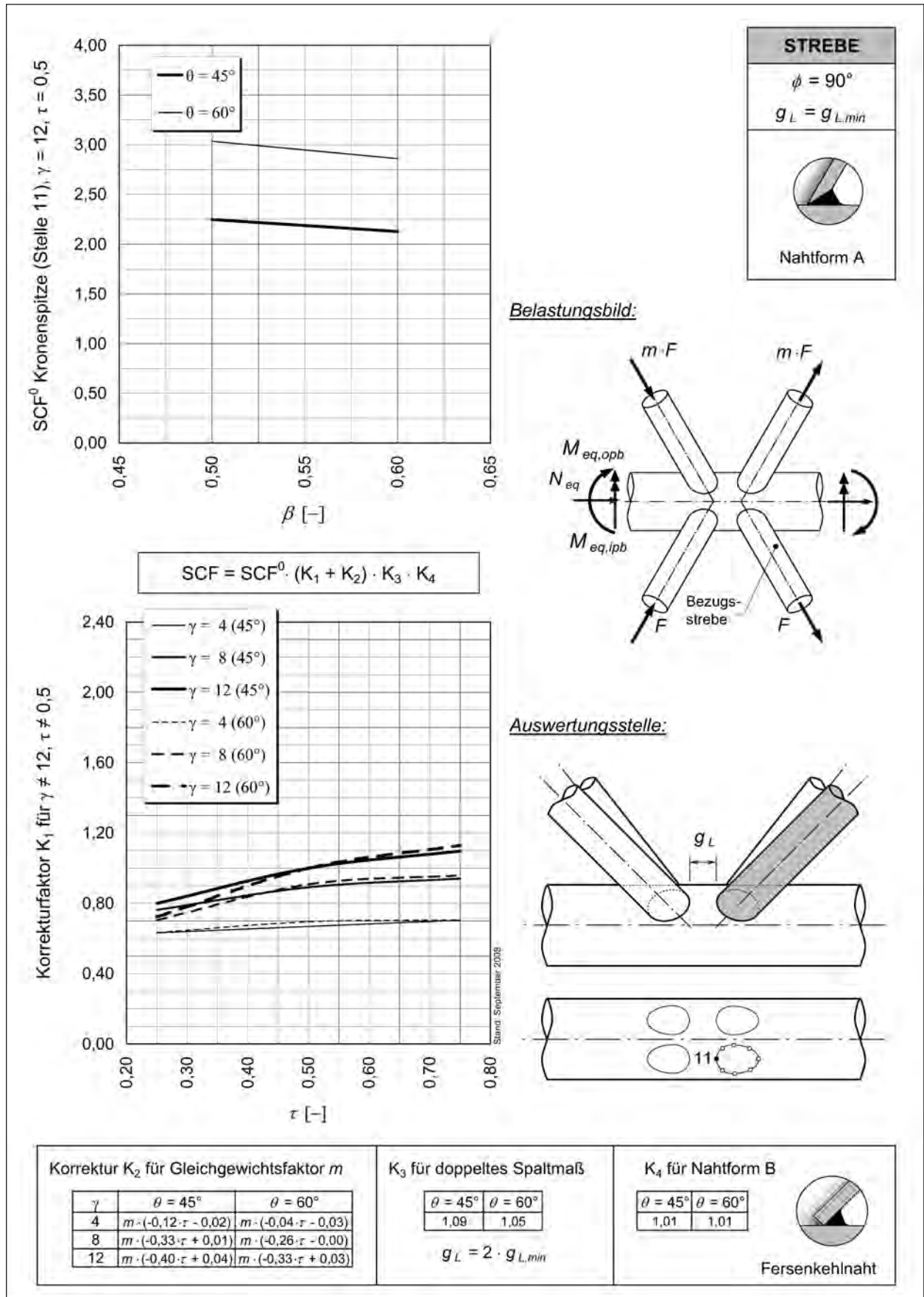


Bild 3-47: SCF<sub>ax,br</sub> für Lastfall 4, 5, 6 (Strebennormalkraft), Kronenspitze (11), Strebe

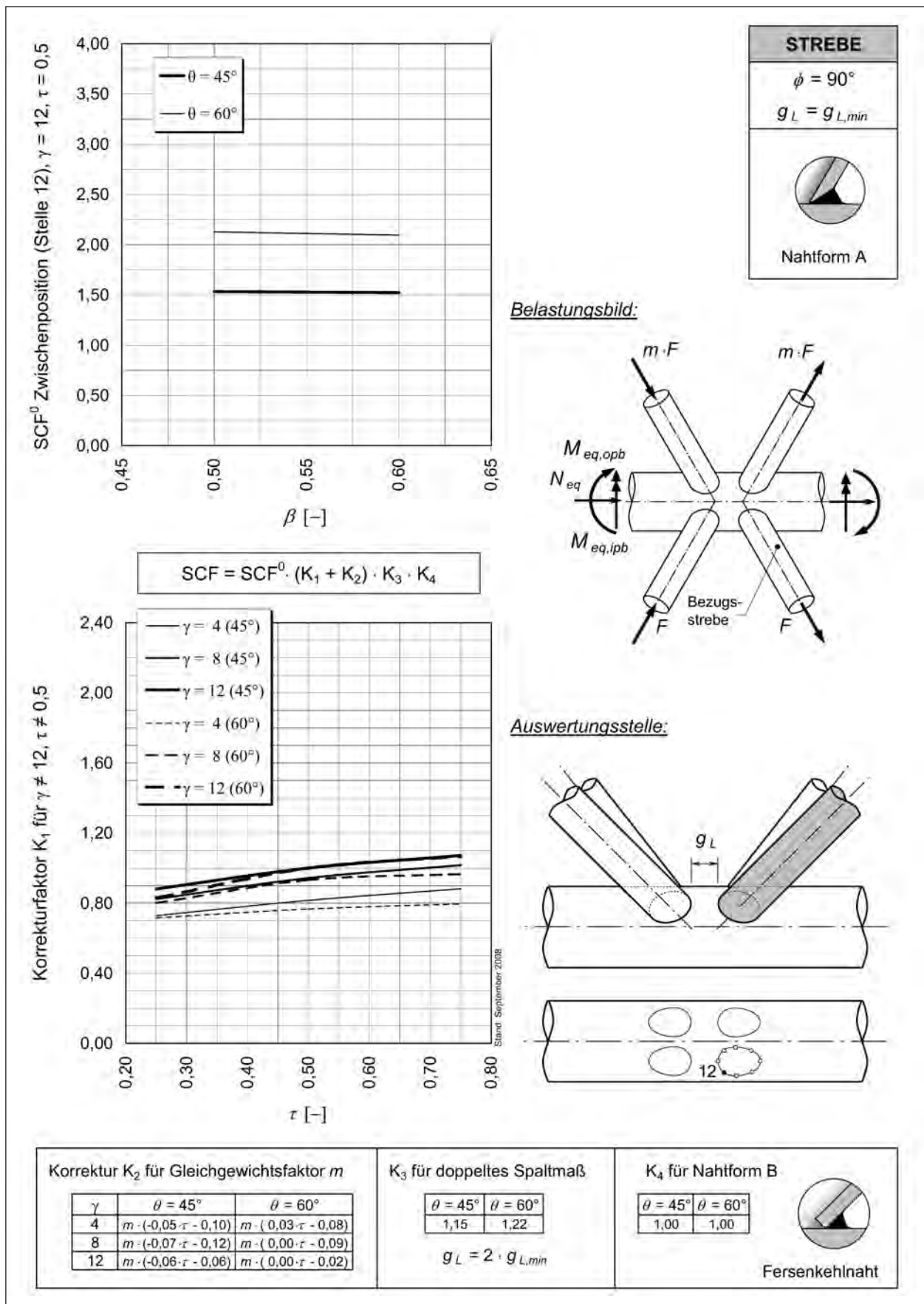


Bild 3-48: SCF<sub>ax,br</sub> für Lastfall 4, 5, 6 (Strebennormalkraft), Zwischenposition (12), Strebe

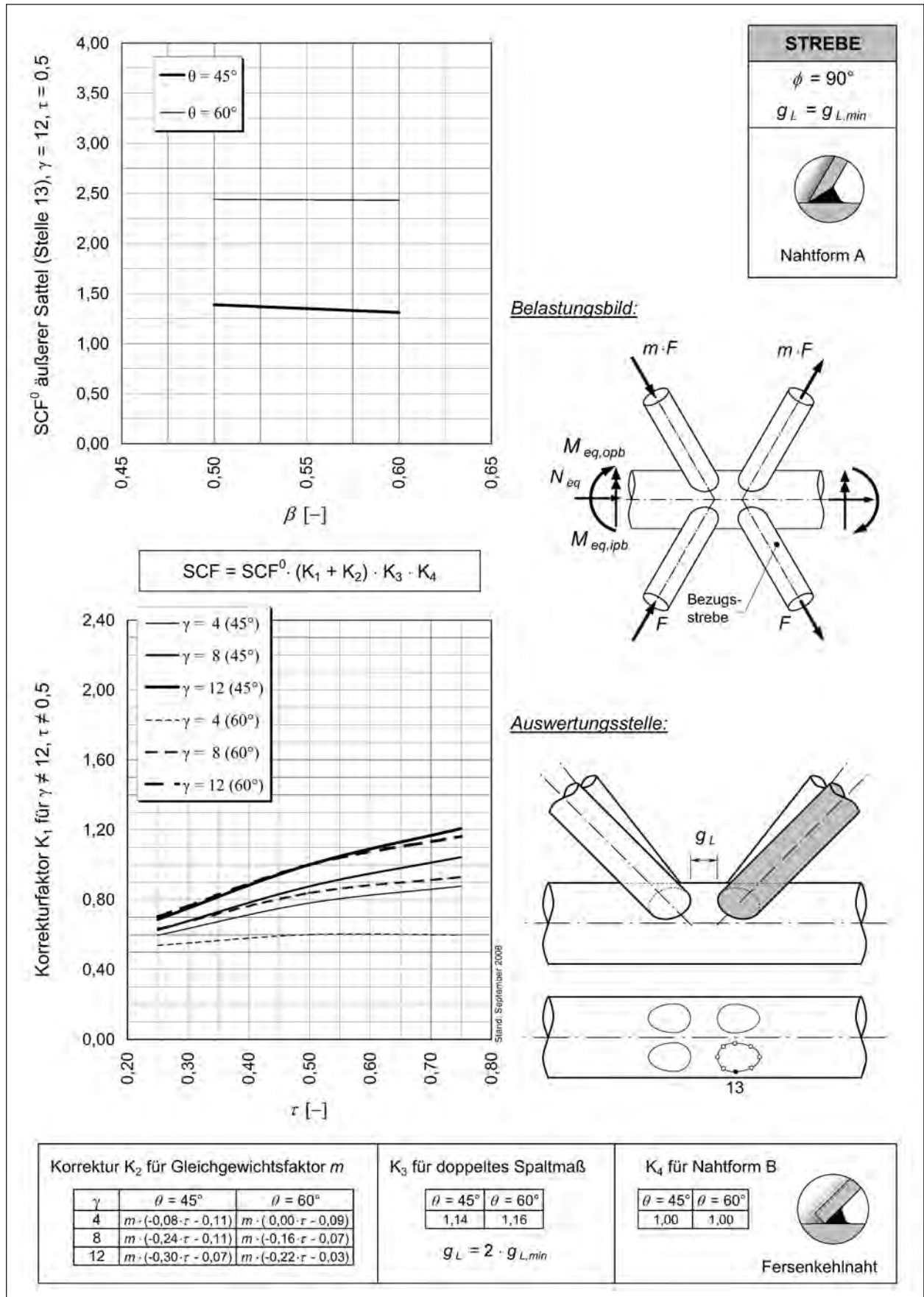


Bild 3-49: SCF<sub>ax,br</sub> für Lastfall 4, 5, 6 (Strebennormalkraft), äußerer Sattel (13), Strebe

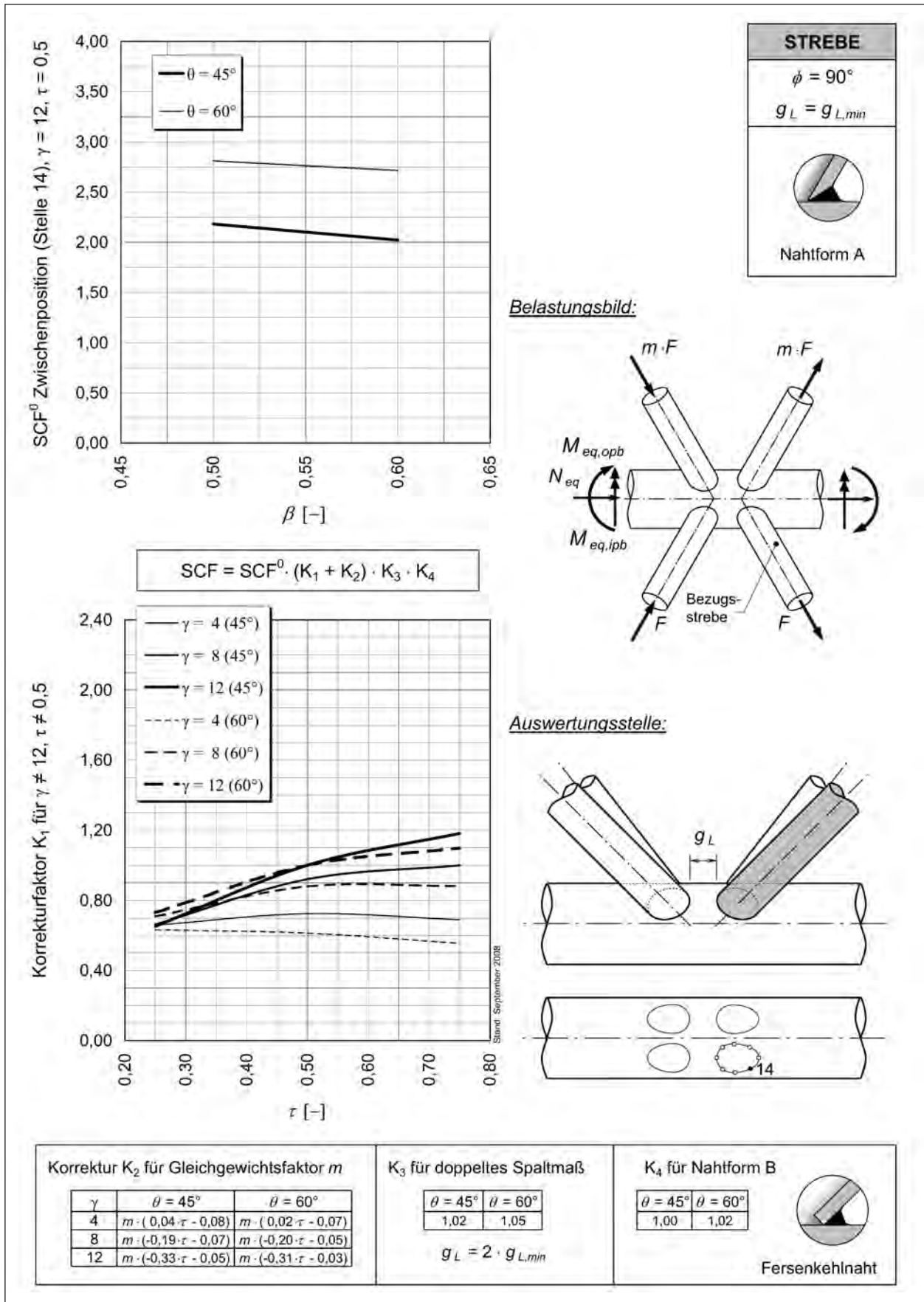


Bild 3-50: SCF<sub>ax,br</sub> für Lastfall 4, 5, 6 (Strebennormalkraft), Zwischenposition (14), Strebe

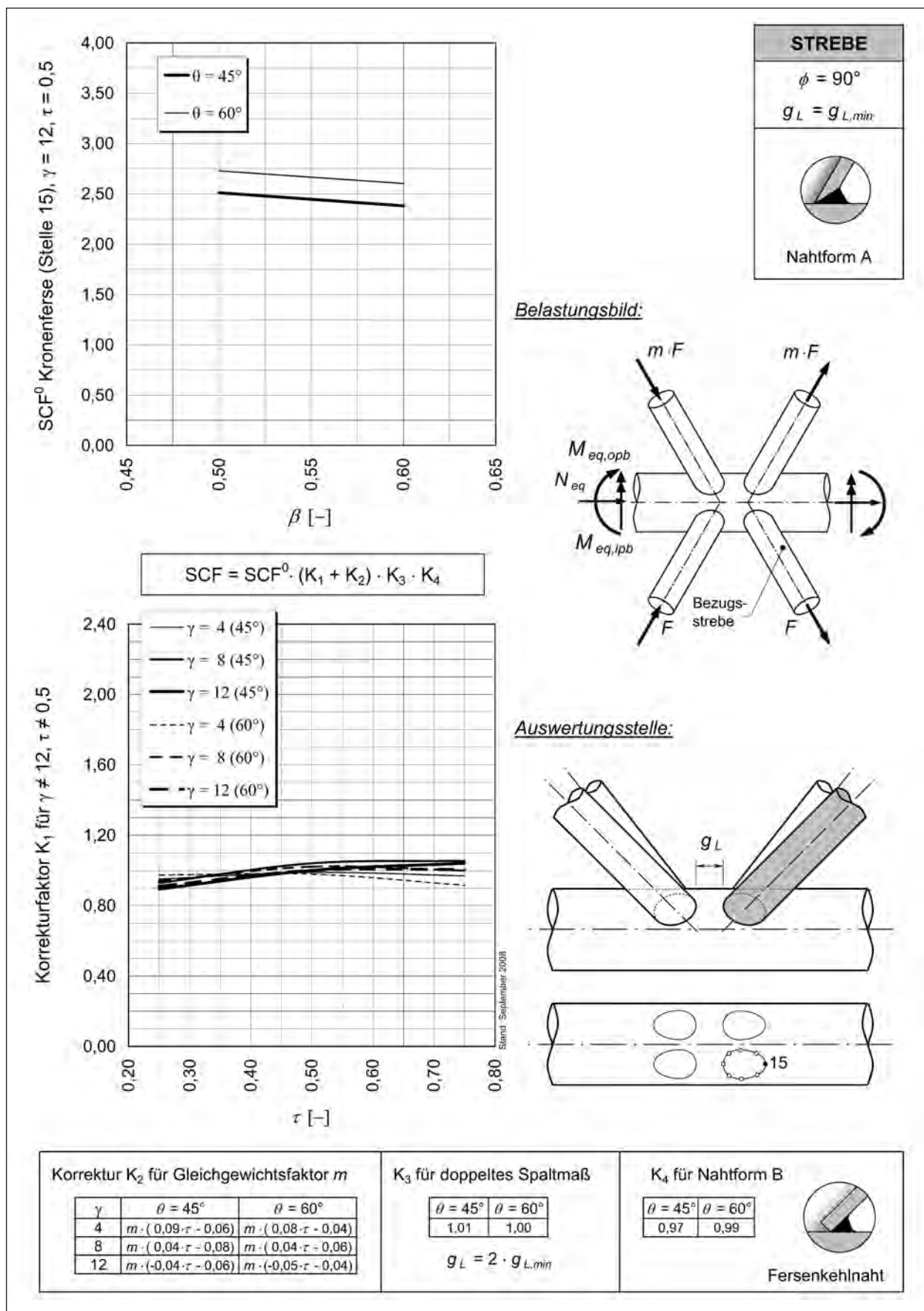


Bild 3-51: SCF<sub>ax,br</sub> für Lastfall 4, 5, 6 (Strebennormalkraft), Kronenferse (15), Strebe

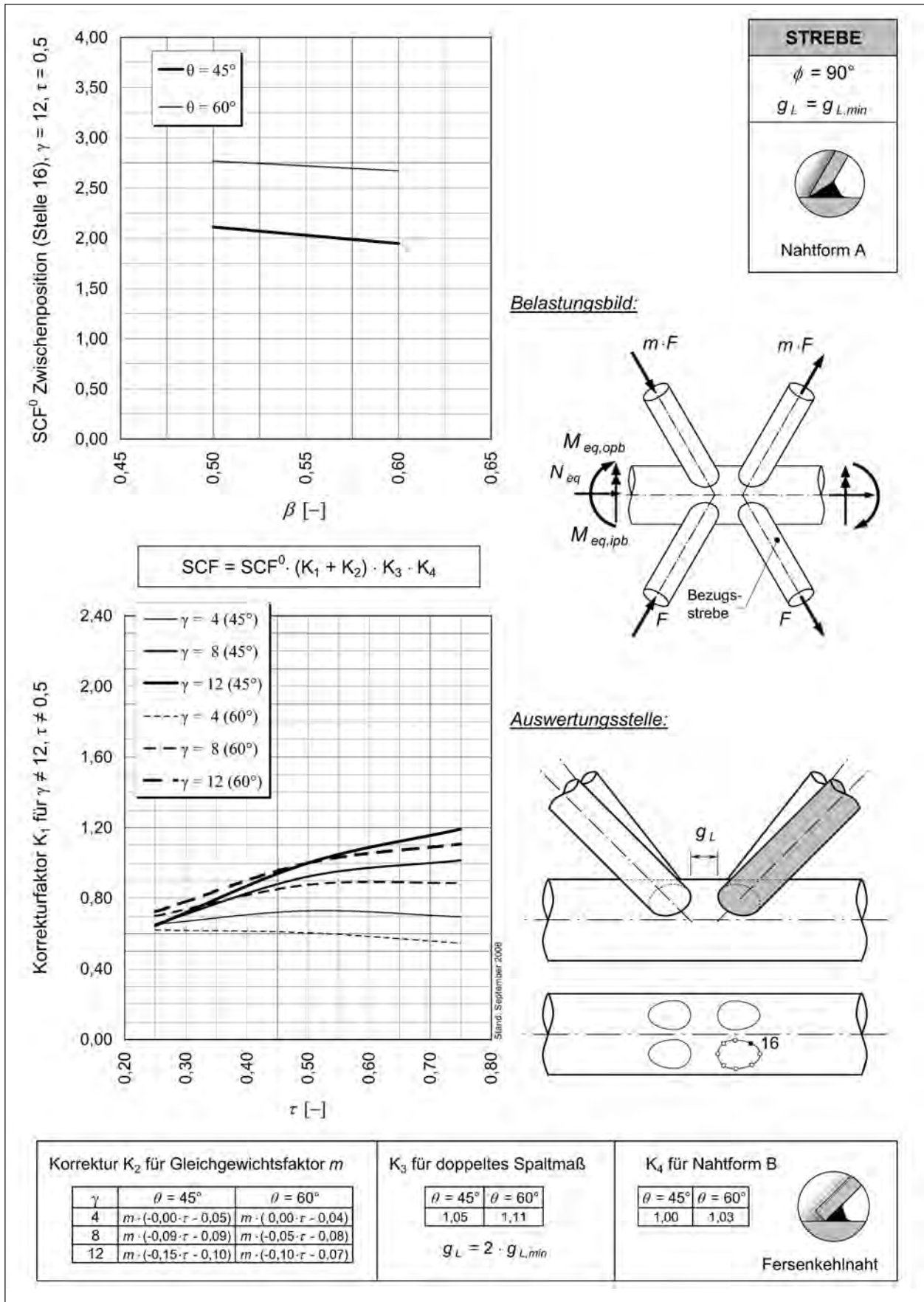


Bild 3-52: SCF<sub>ax,br</sub> für Lastfall 4, 5, 6 (Strebennormalkraft), Zwischenposition (16), Strebe



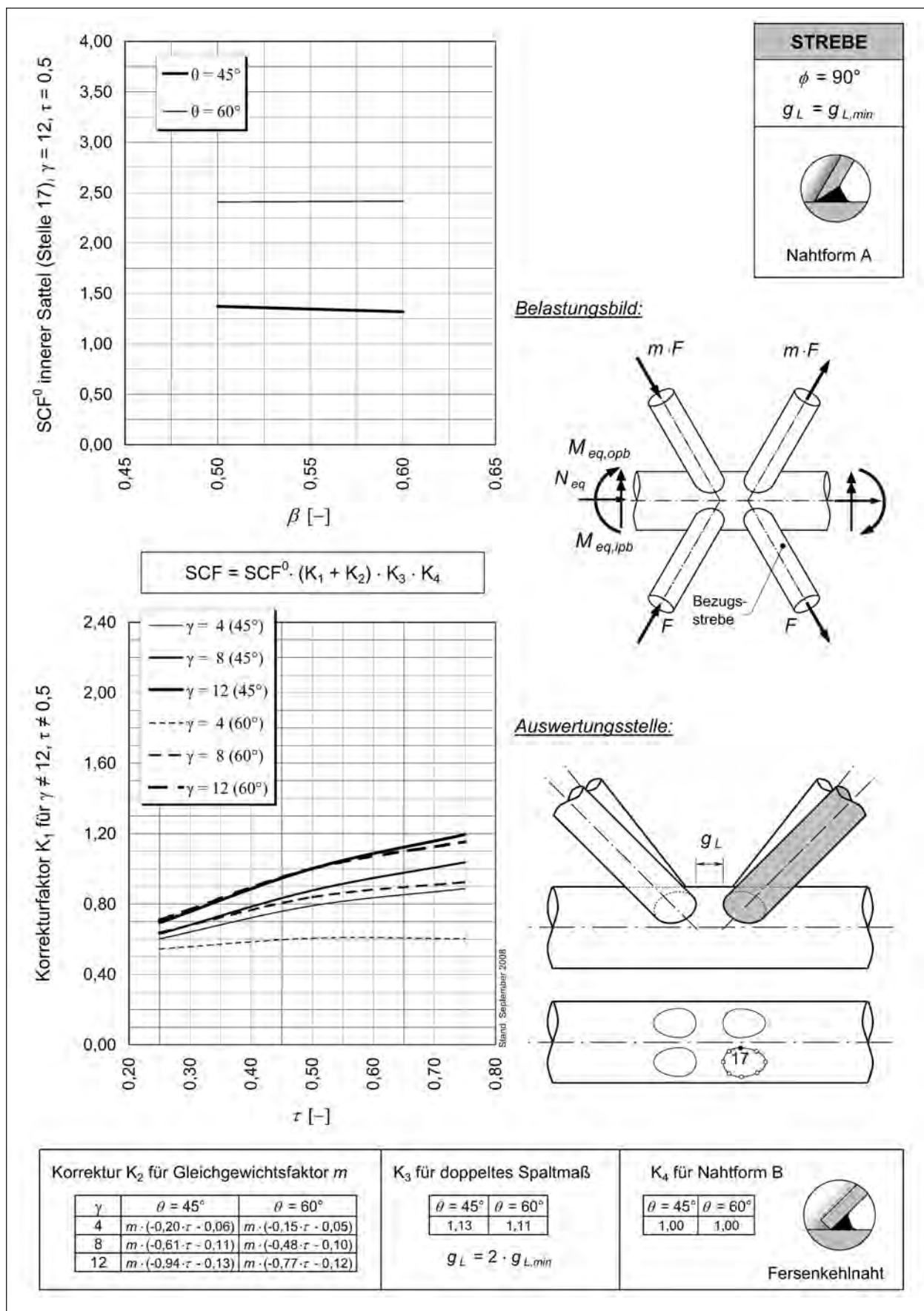


Bild 3-53: SCF<sub>ax,br</sub> für Lastfall 4, 5, 6 (Strebennormalkraft), innerer Sattel (17), Strebe

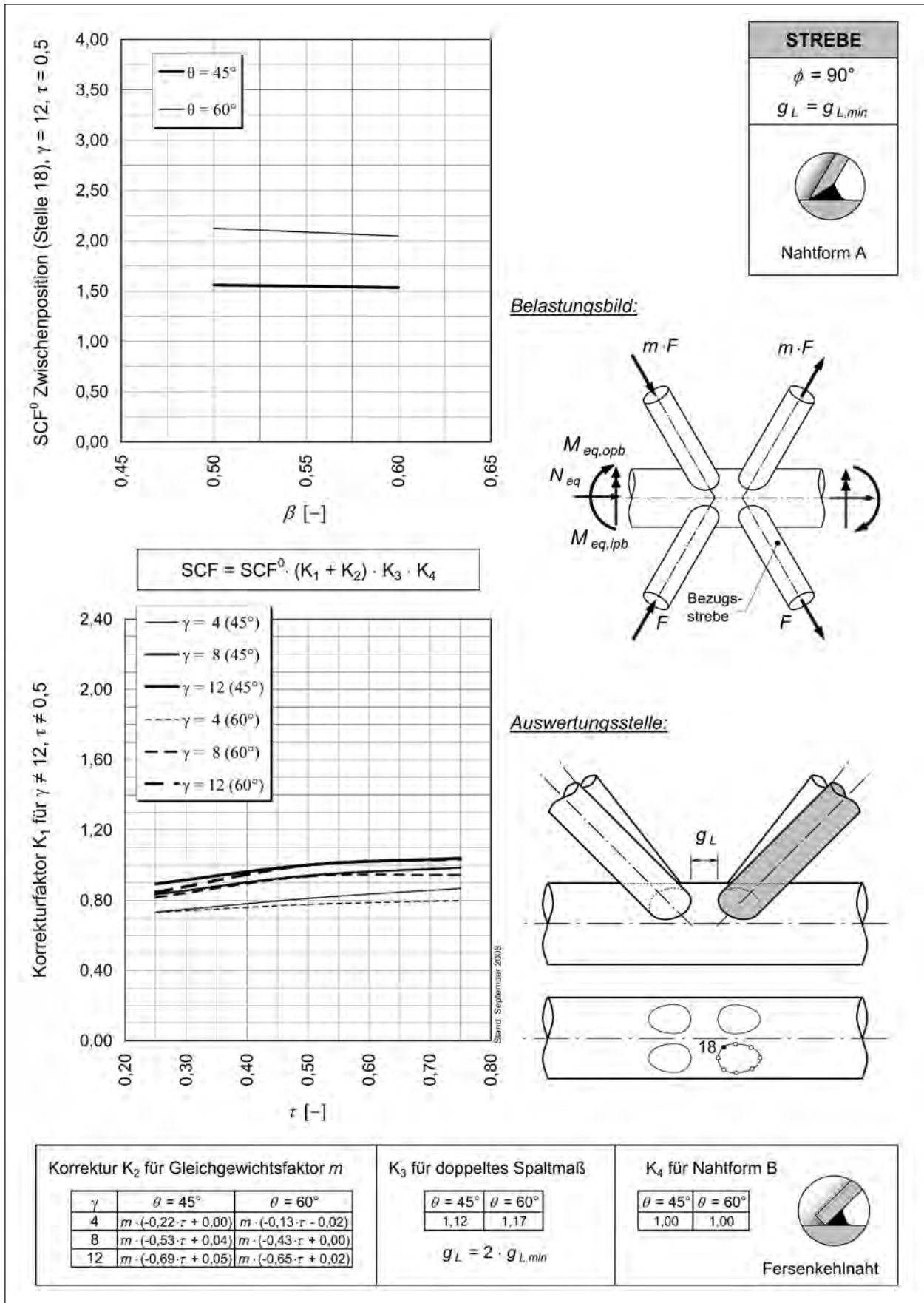


Bild 3-54: SCF<sub>ax,br</sub> für Lastfall 4, 5, 6 (Strebennormalkraft), Zwischenposition (18), Strebe

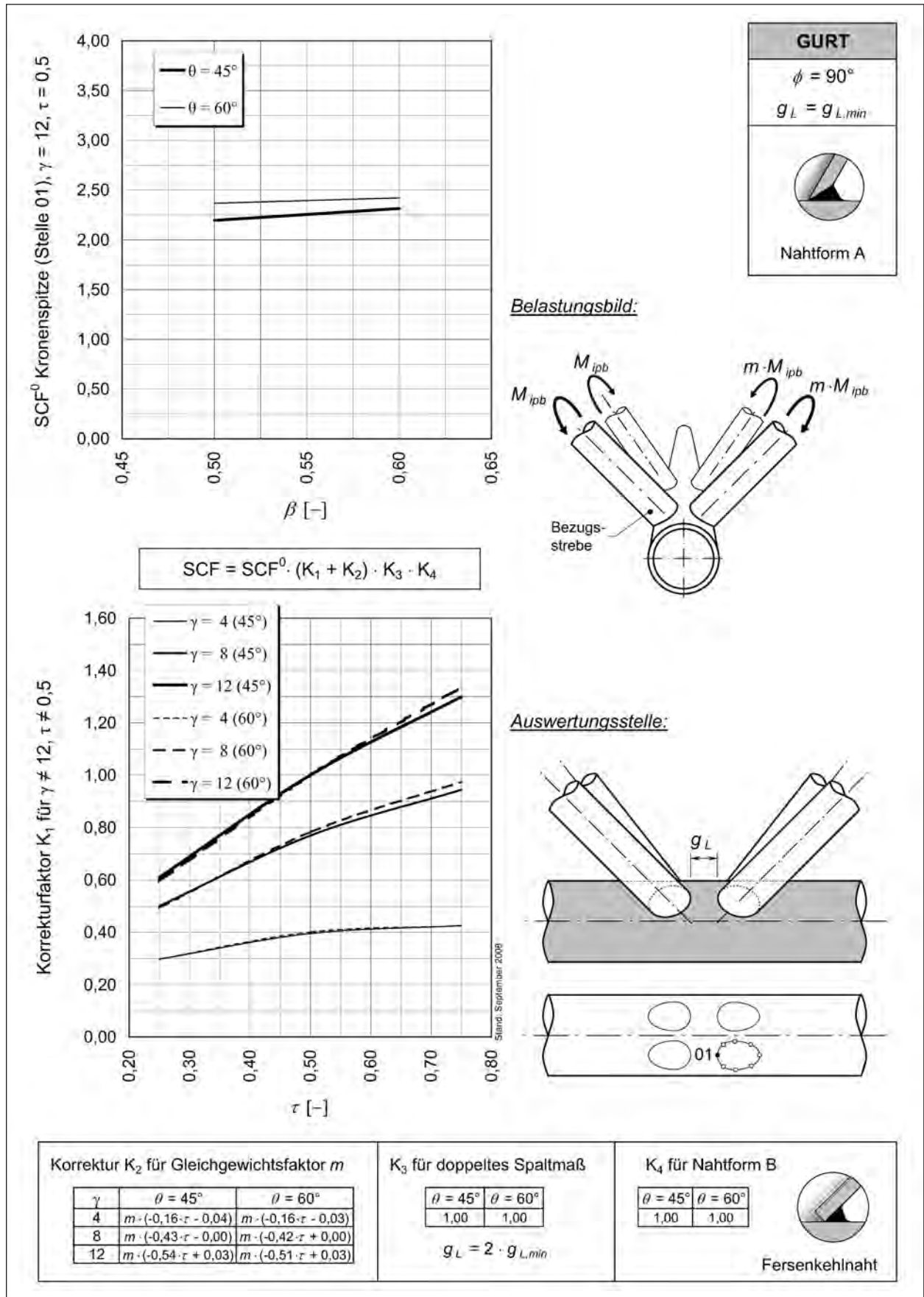


Bild 3-55: SCF<sub>ipb,br</sub> für Lastfall 7, 8, 9 (ausgeglichene Strebenbiegung in der Ebene der Fachwerkwand), Kronenspitze (01), Gurt

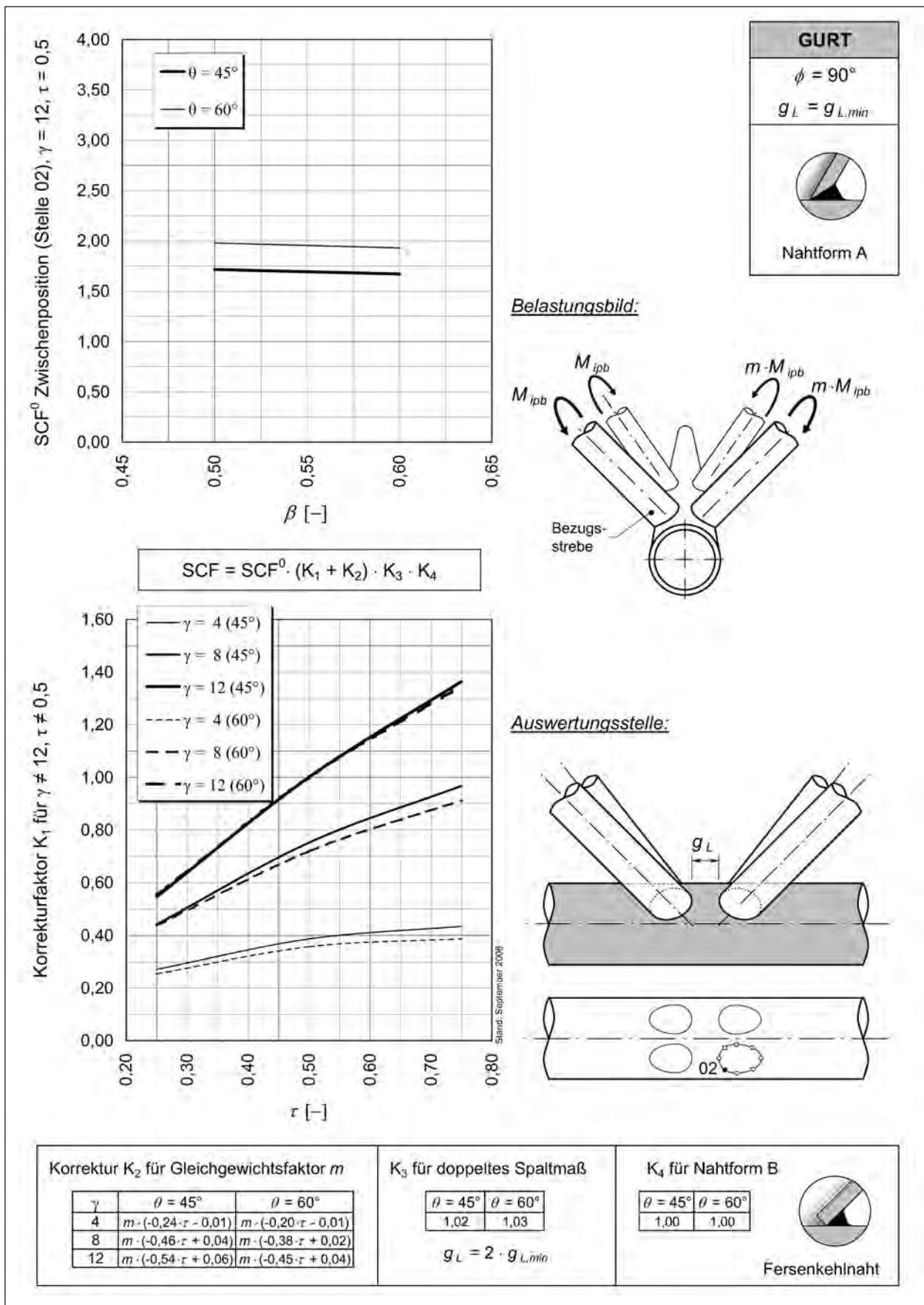


Bild 3-56: SCF<sub>ipb,br</sub> für Lastfall 7, 8, 9 (ausgeglichene Strebenbiegung in der Ebene der Fachwerkwand), Zwischenposition (02), Gurt

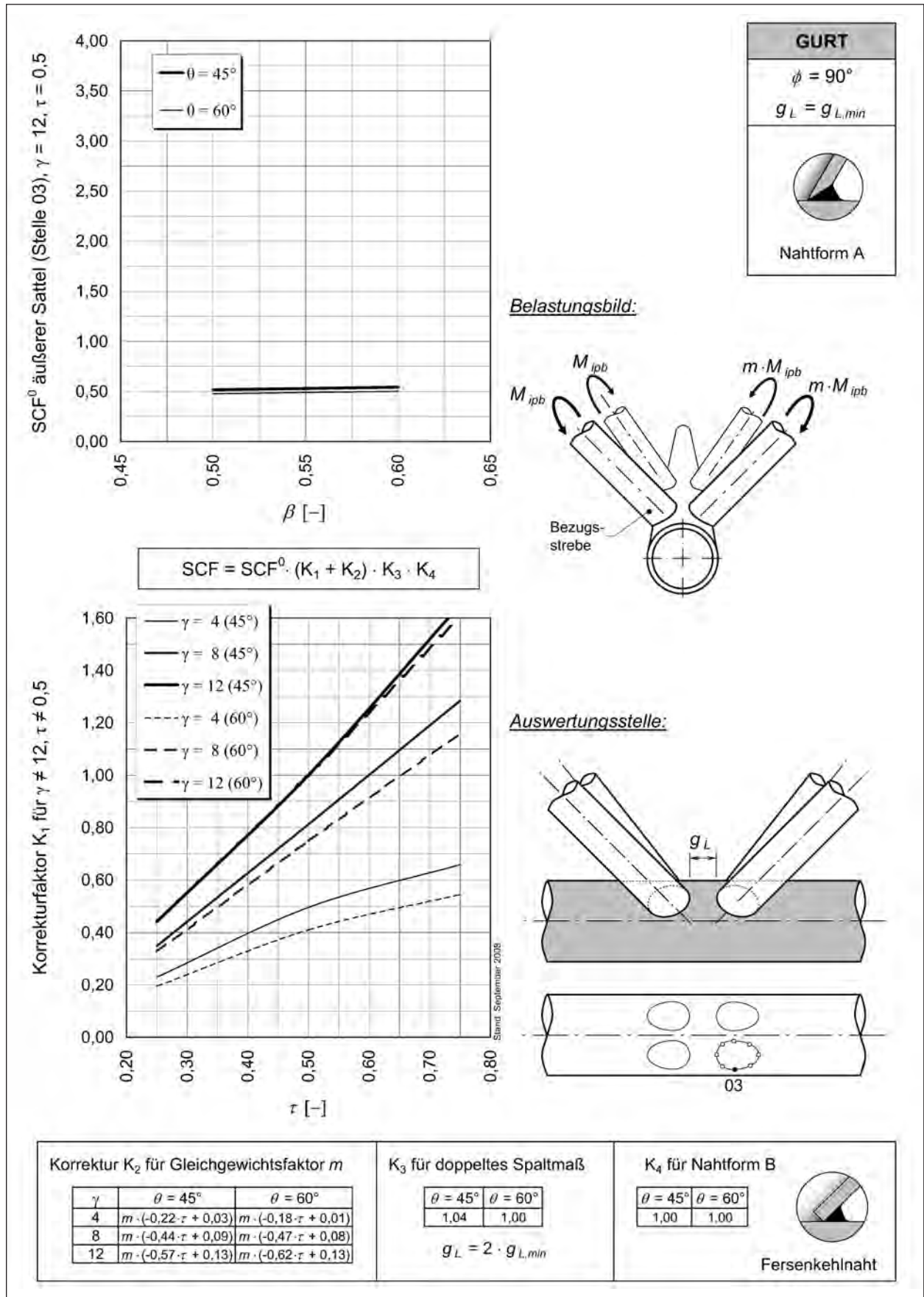


Bild 3-57: SCF<sub>ipb,br</sub> für Lastfall 7, 8, 9 (ausgeglichene Strebenbiegung in der Ebene der Fachwerkwand), äußerer Sattel (03), Gurt

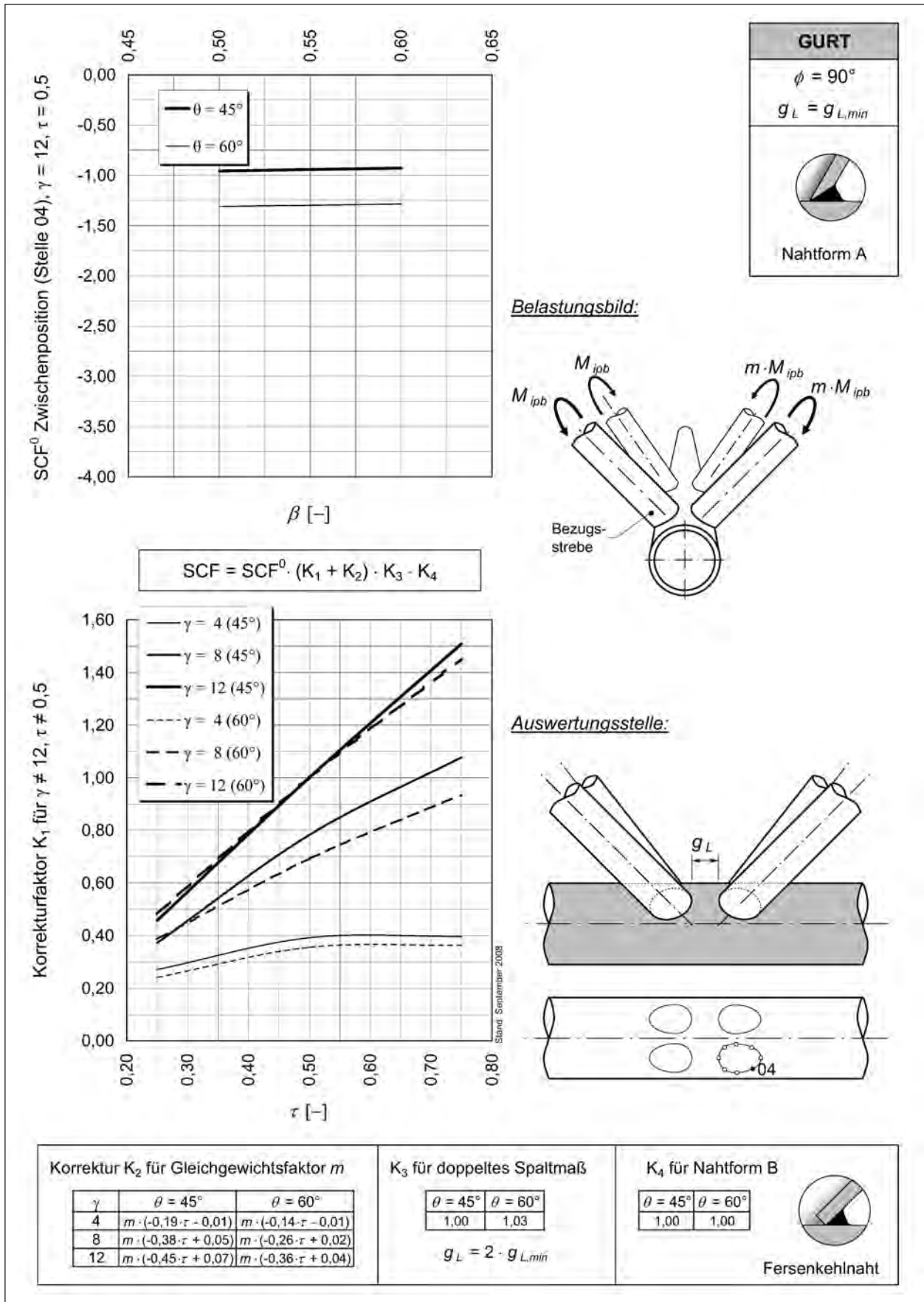


Bild 3-58: SCF<sub>ipb,br</sub> für Lastfall 7, 8, 9 (ausgeglichene Strebenbiegung in der Ebene der Fachwerkwand), Zwischenposition (04), Gurt

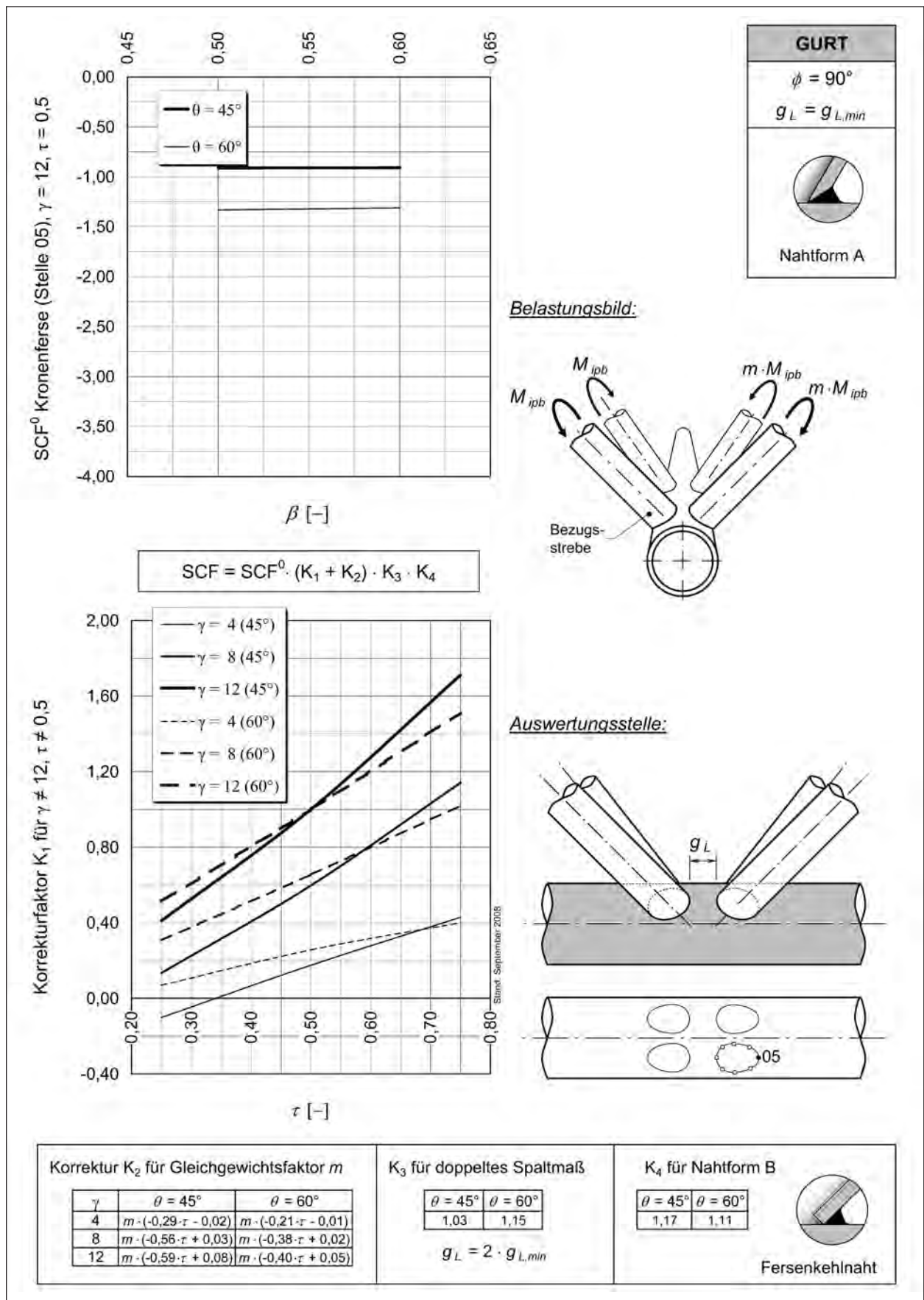


Bild 3-59: SCF<sub>ipb,br</sub> für Lastfall 7, 8, 9 (ausgeglichene Strebenbiegung in der Ebene der Fachwerkwand), Kronenferse (05), Gurt

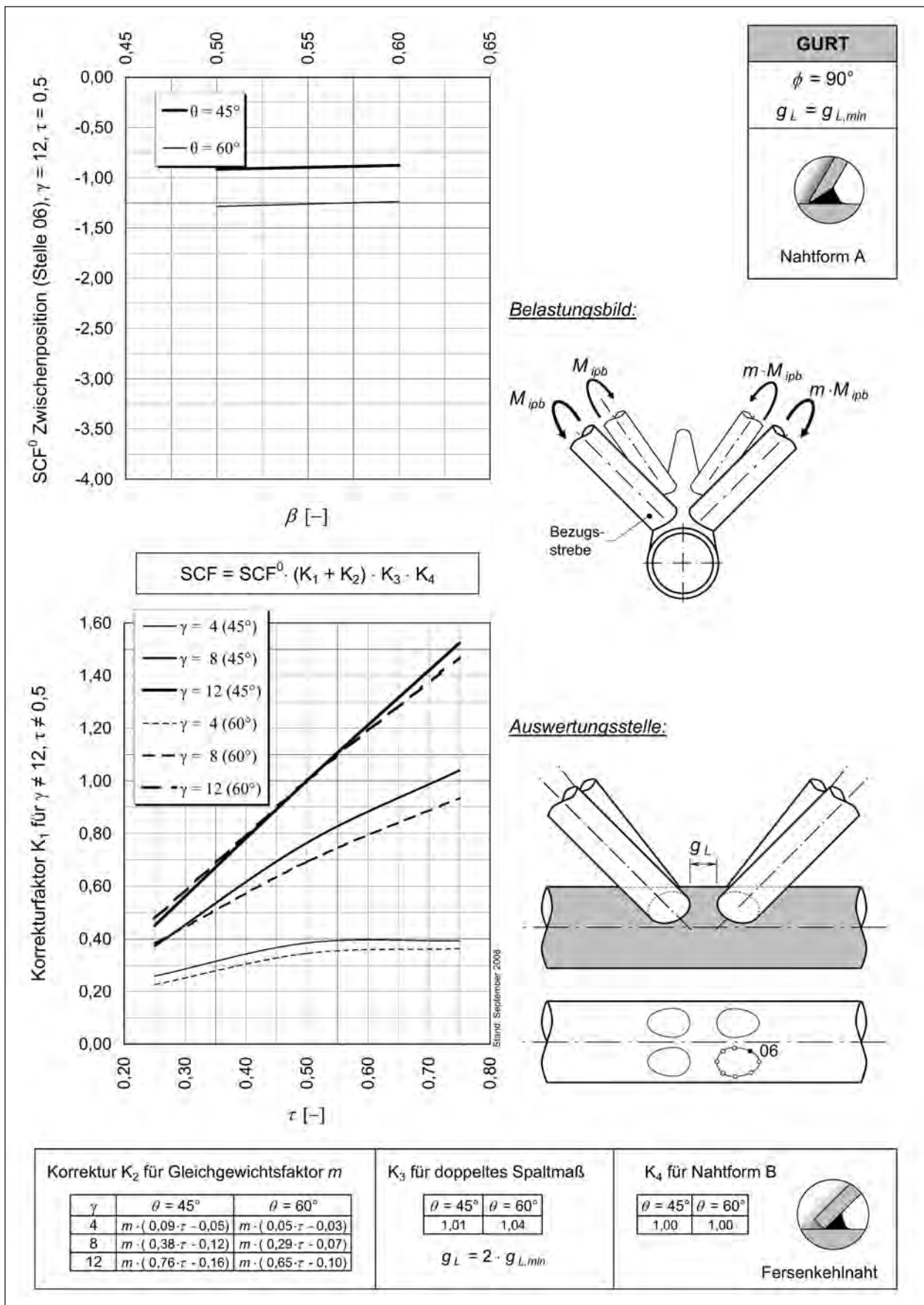


Bild 3-60: SCF<sub>ipb,br</sub> für Lastfall 7, 8, 9 (ausgeglichene Strebenbiegung in der Ebene der Fachwerkwand), Zwischenposition (06), Gurt



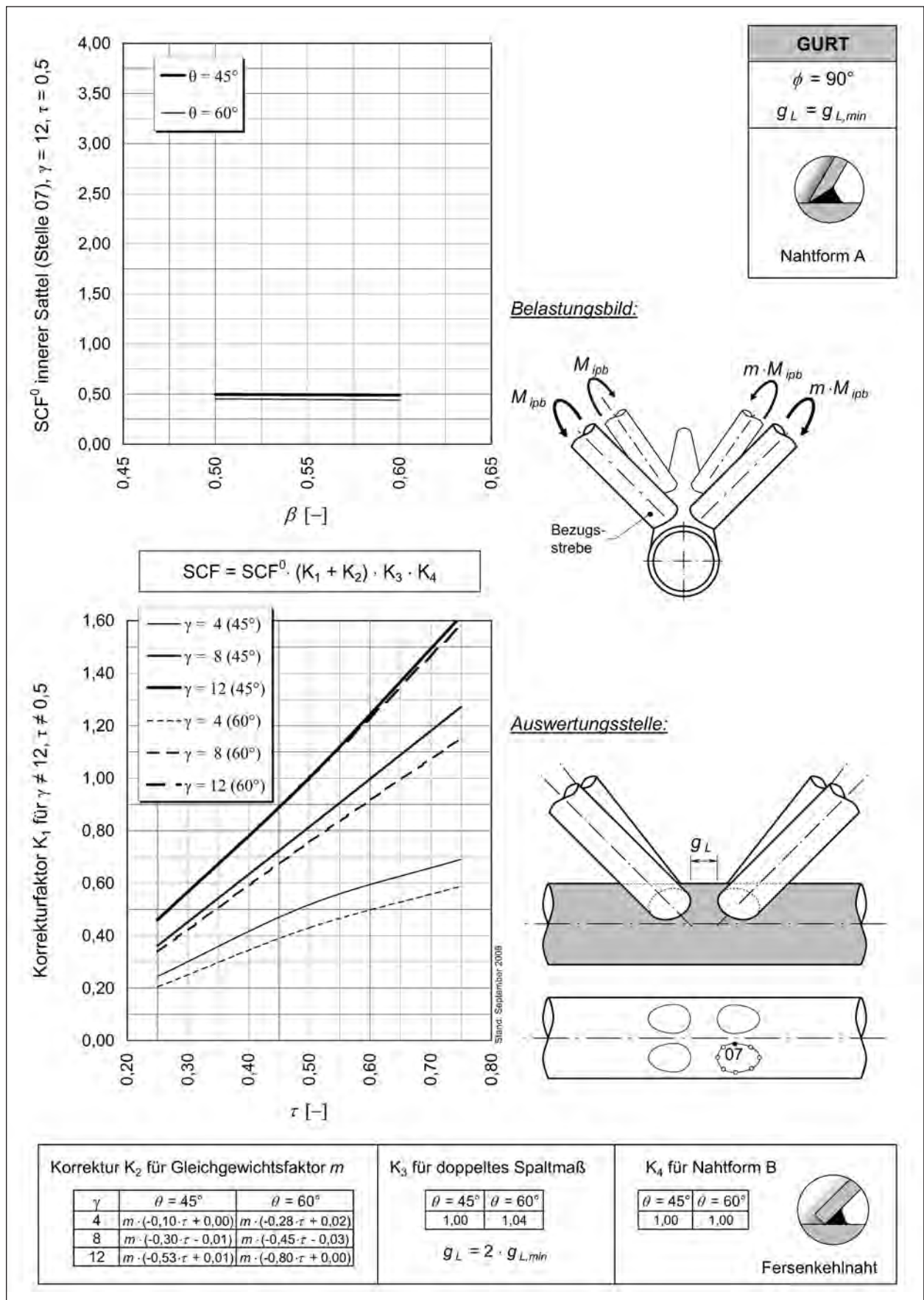
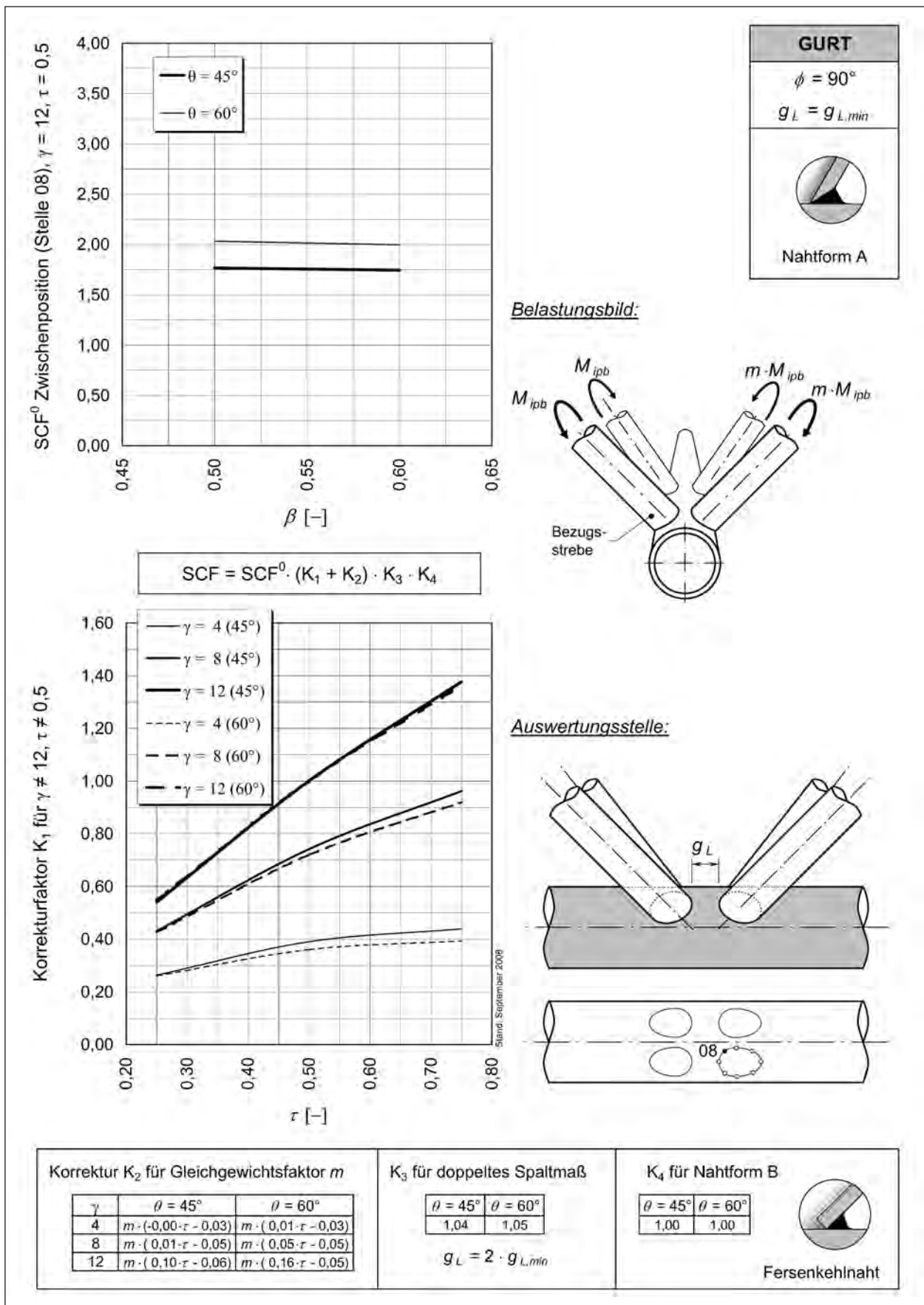


Bild 3-61: SCF<sub>ipb,br</sub> für Lastfall 7, 8, 9 (ausgeglichene Strebenbiegung in der Ebene der Fachwerkwand), innerer Sattel (07), Gurt



**Bild 3-62:** SCF<sub>ipb,br</sub> für Lastfall 7, 8, 9 (ausgeglichene Strebenbiegung in der Ebene der Fachwerkwand), Zwischenposition (08), Gurt

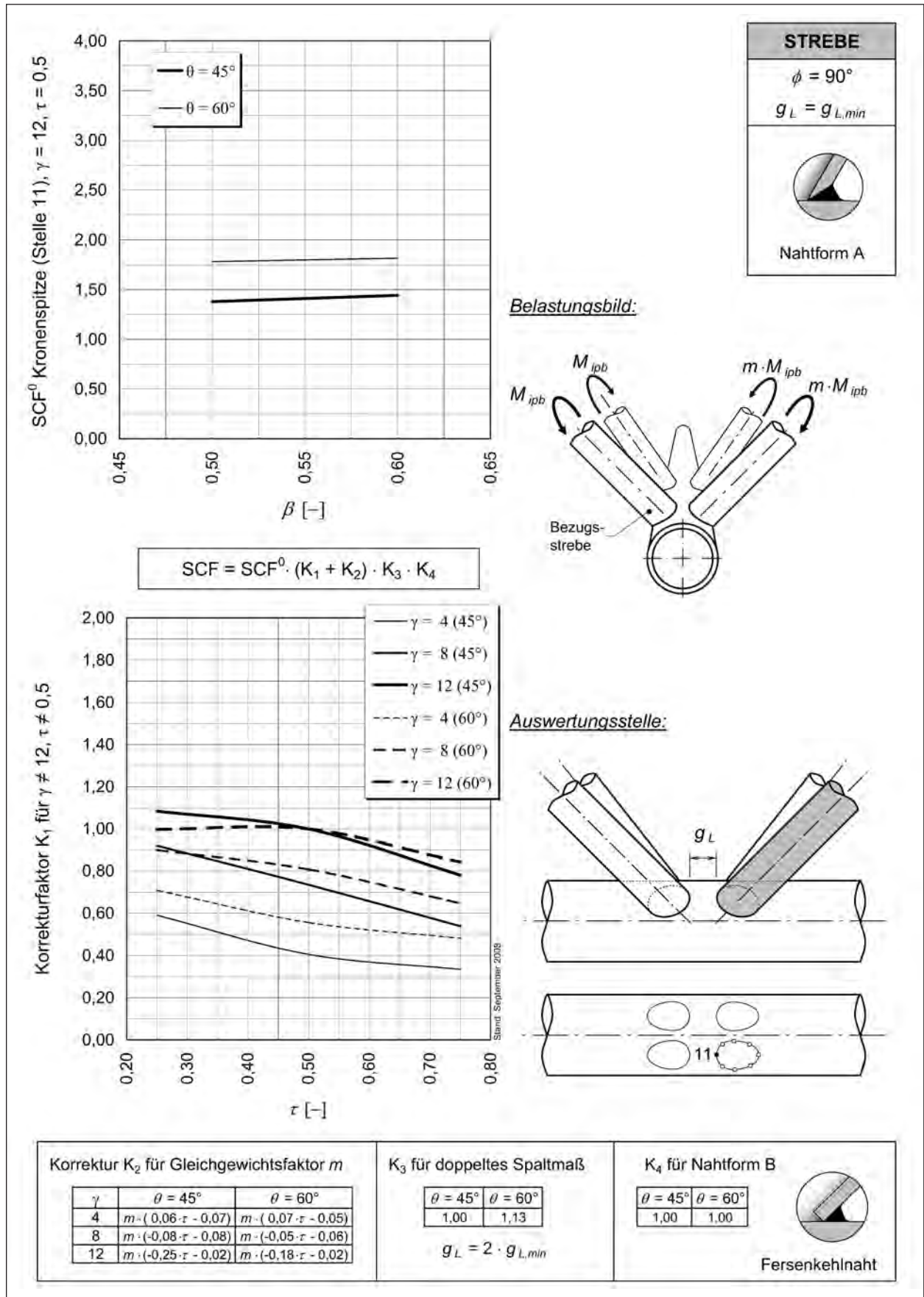
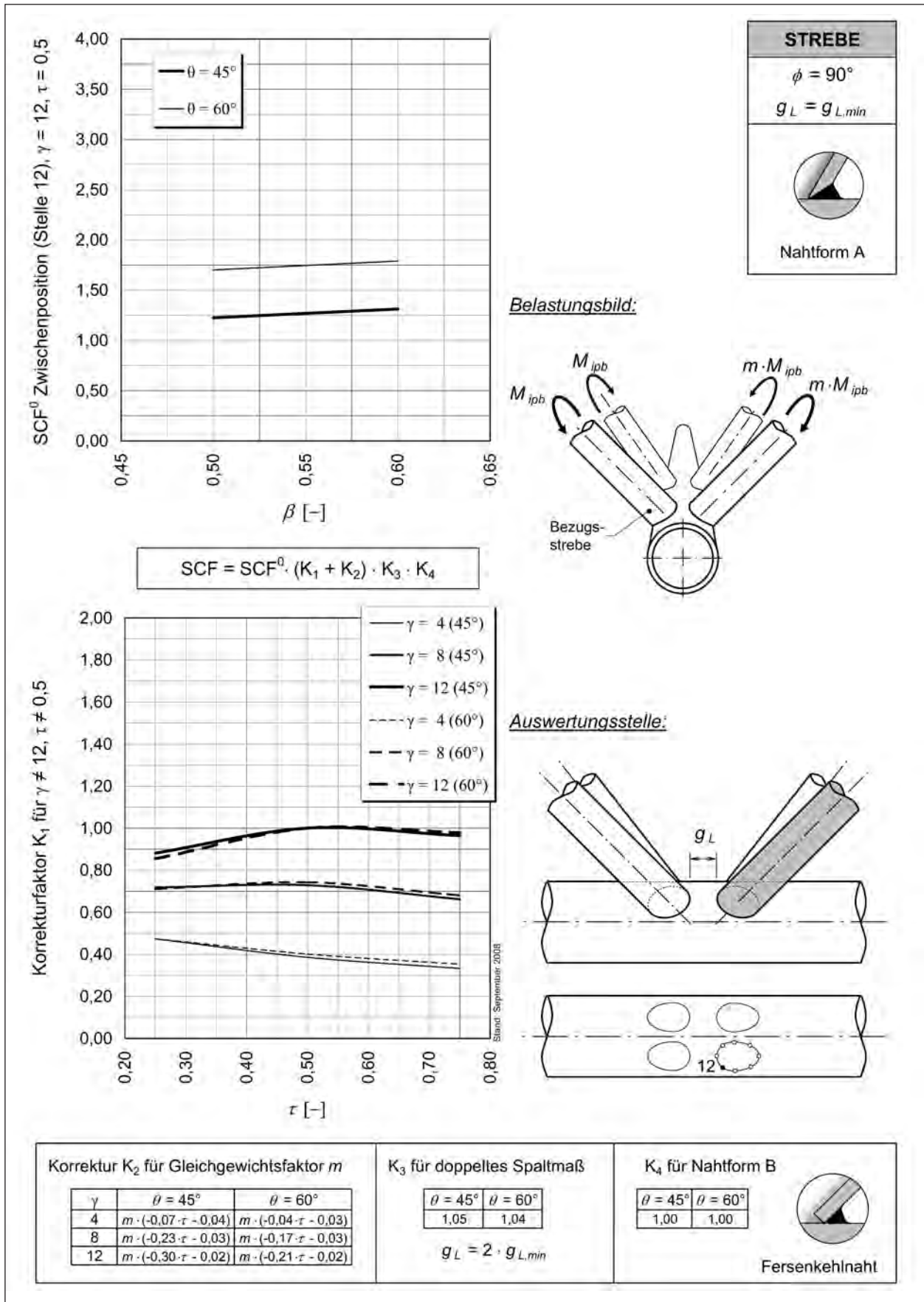


Bild 3-63: SCF<sub>ipb,br</sub> für Lastfall 7, 8, 9 (ausgeglichene Strebenbiegung in der Ebene der Fachwerkwand), Kronenspitze (11), Strebe



**Bild 3-64:** SCF<sub>ipb,br</sub> für Lastfall 7, 8, 9 (ausgeglichene Strebenbiegung in der Ebene der Fachwerkwand), Zwischenposition (12), Strebe

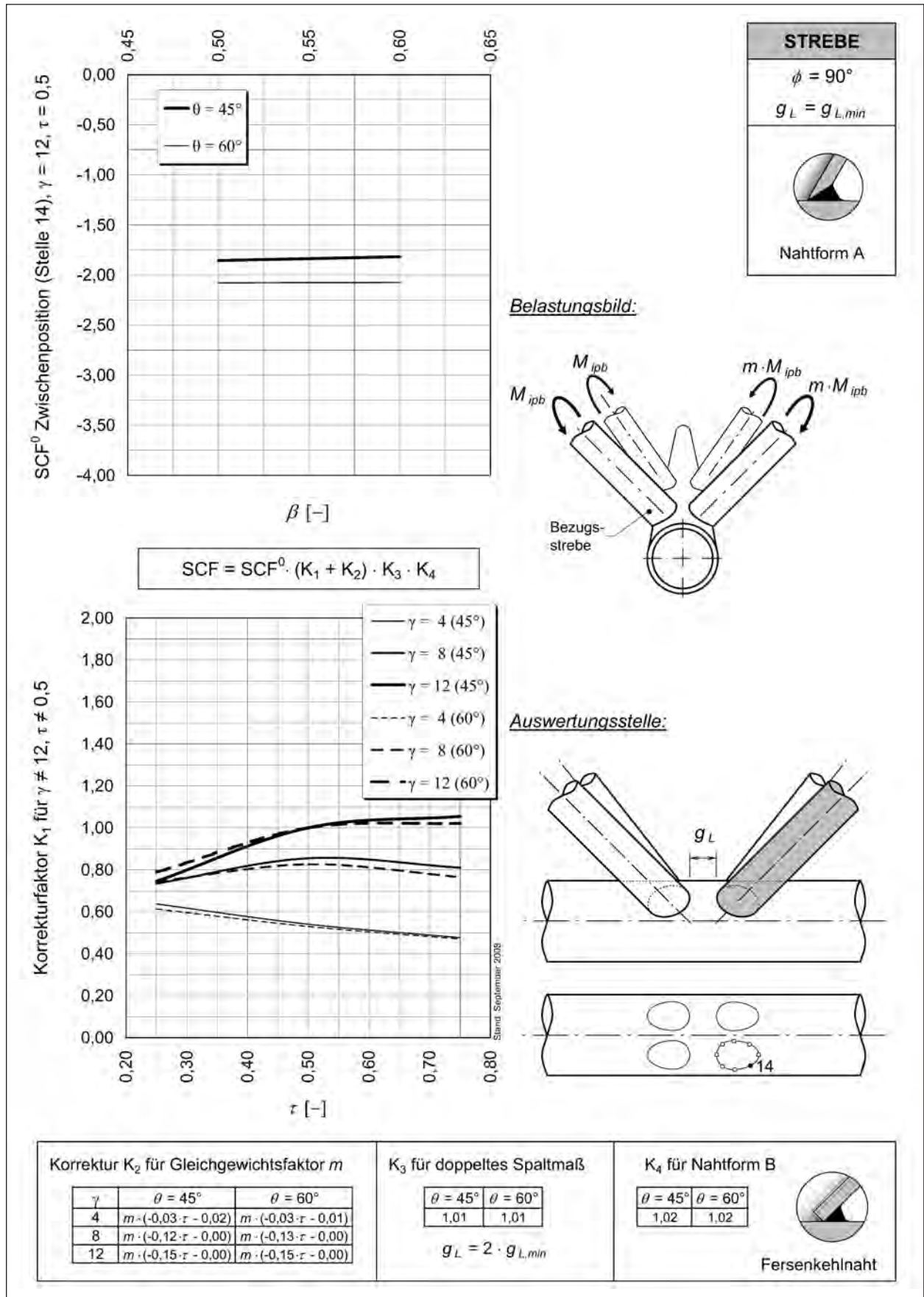


Bild 3-65: SCF<sub>ipb,br</sub> für Lastfall 7, 8, 9 (ausgeglichene Strebenbiegung in der Ebene der Fachwerkwand), Zwischenposition (14), Strebe

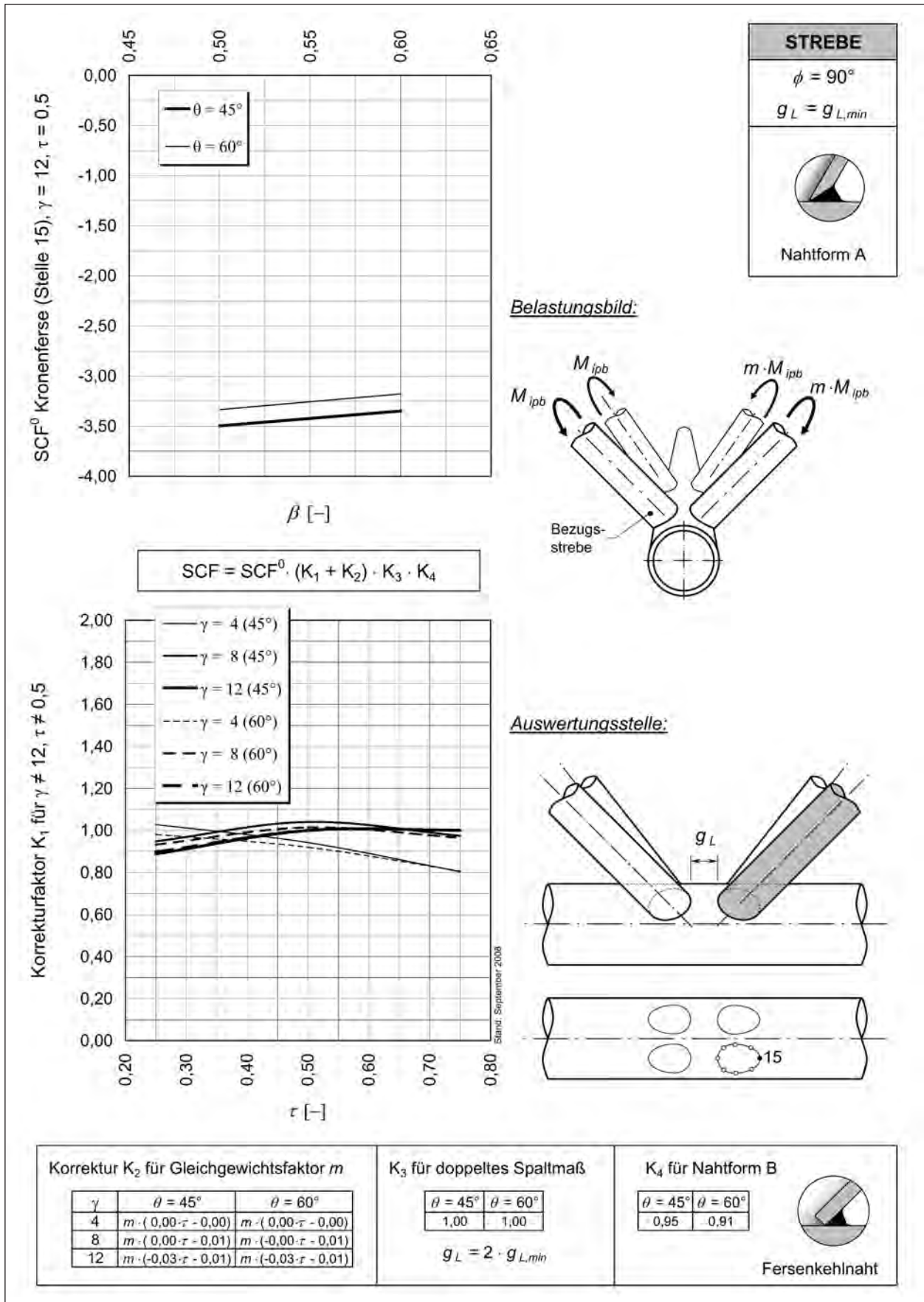


Bild 3-66: SCF<sub>ipb,br</sub> für Lastfall 7, 8, 9 (ausgeglichene Strebenbiegung in der Ebene der Fachwerkwand), Kronenferse (15), Strebe

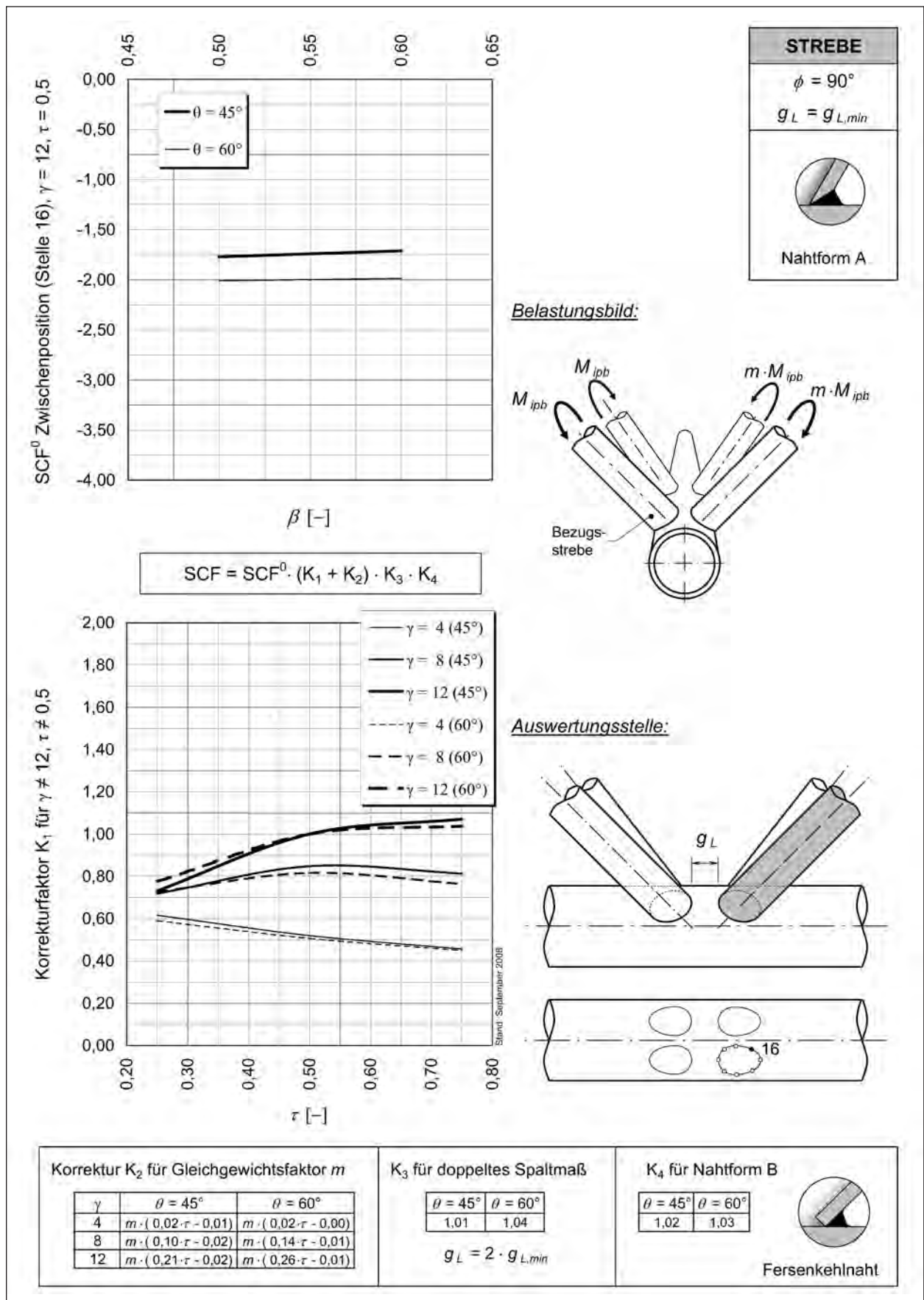
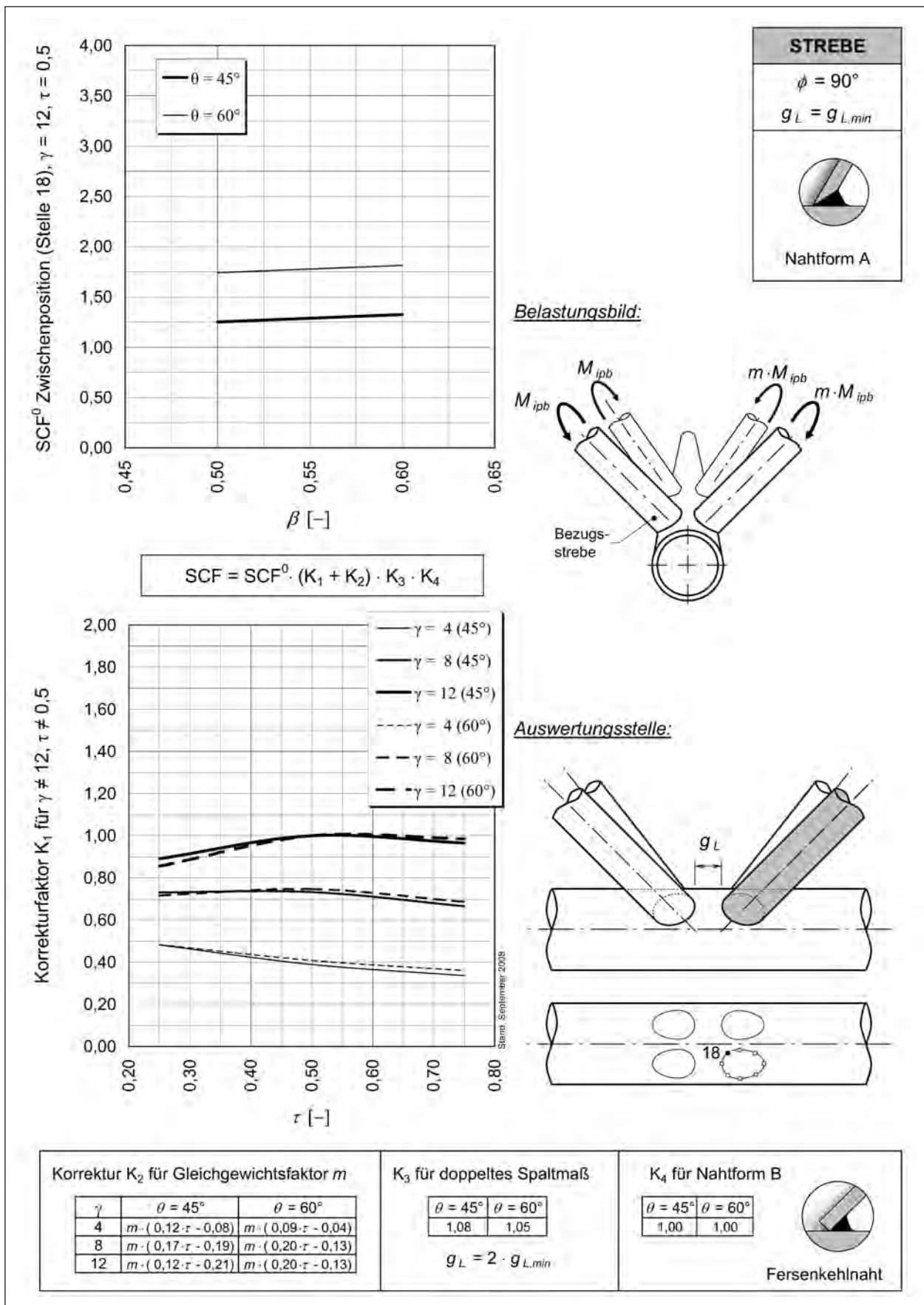
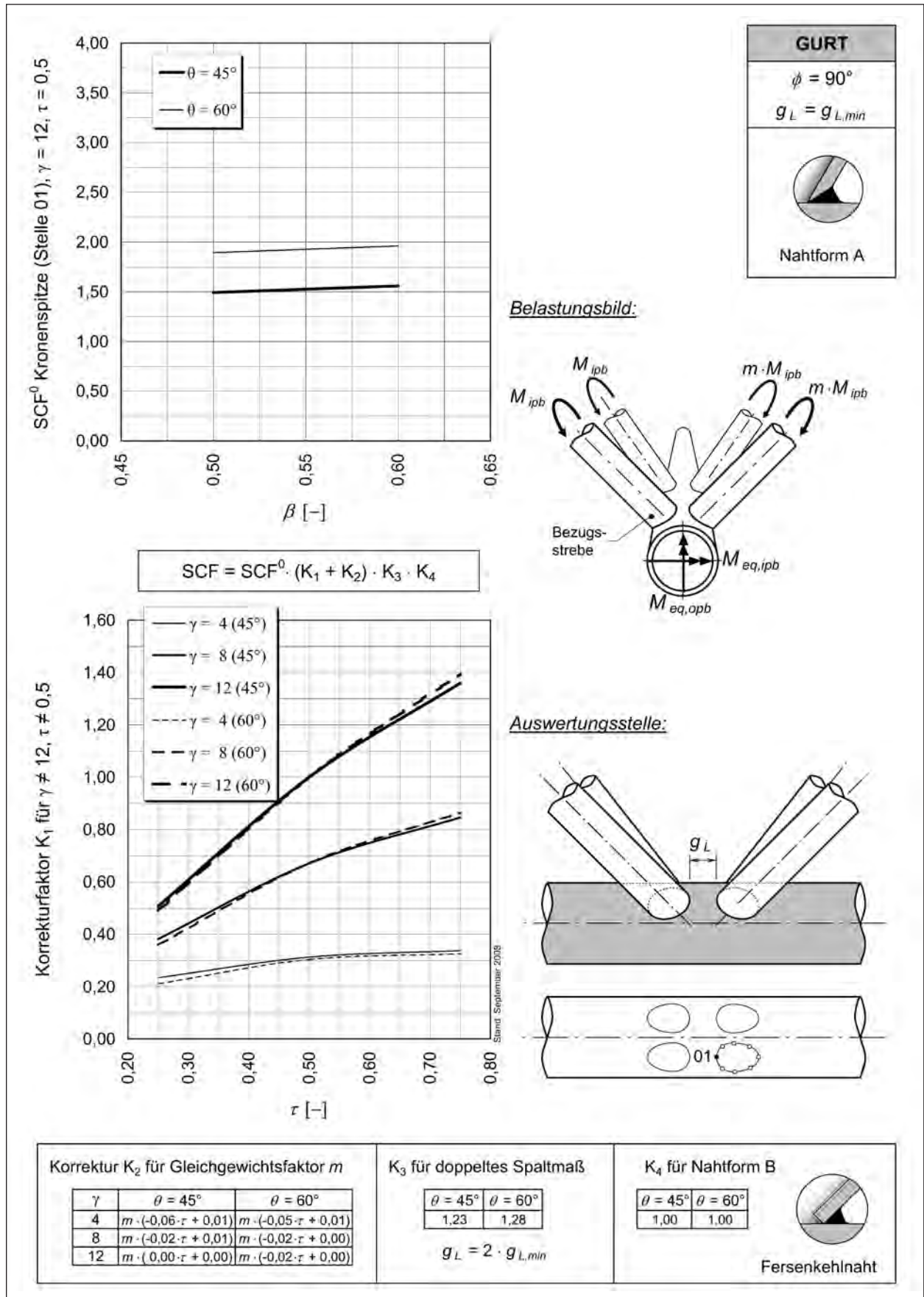


Bild 3-67: SCF<sub>ipb,br</sub> für Lastfall 7, 8, 9 (ausgeglichene Strebenbiegung in der Ebene der Fachwerkwand), Zwischenposition (16), Strebe



**Bild 3-68:** SCF<sub>ipb,br</sub> für Lastfall 7, 8, 9 (ausgeglichene Strebenbiegung in der Ebene der Fachwerkwand), Zwischenposition (18), Strebe





$SCF = SCF^0 \cdot (K_1 + K_2) \cdot K_3 \cdot K_4$

Korrekturfaktor  $K_1$  für  $\gamma \neq 12, \tau \neq 0,5$

$\tau$  [-]

**Auswertungsstelle:**

**Korrektur  $K_2$  für Gleichgewichtsfaktor  $m$**

$\gamma$	$\theta = 45^\circ$	$\theta = 60^\circ$
4	$m \cdot (-0,06 \cdot \tau + 0,01)$	$m \cdot (-0,05 \cdot \tau + 0,01)$
8	$m \cdot (-0,02 \cdot \tau + 0,01)$	$m \cdot (-0,02 \cdot \tau + 0,00)$
12	$m \cdot (0,00 \cdot \tau + 0,00)$	$m \cdot (-0,02 \cdot \tau + 0,00)$

**$K_3$  für doppeltes Spaltmaß**

$\theta = 45^\circ$	$\theta = 60^\circ$
1,23	1,28

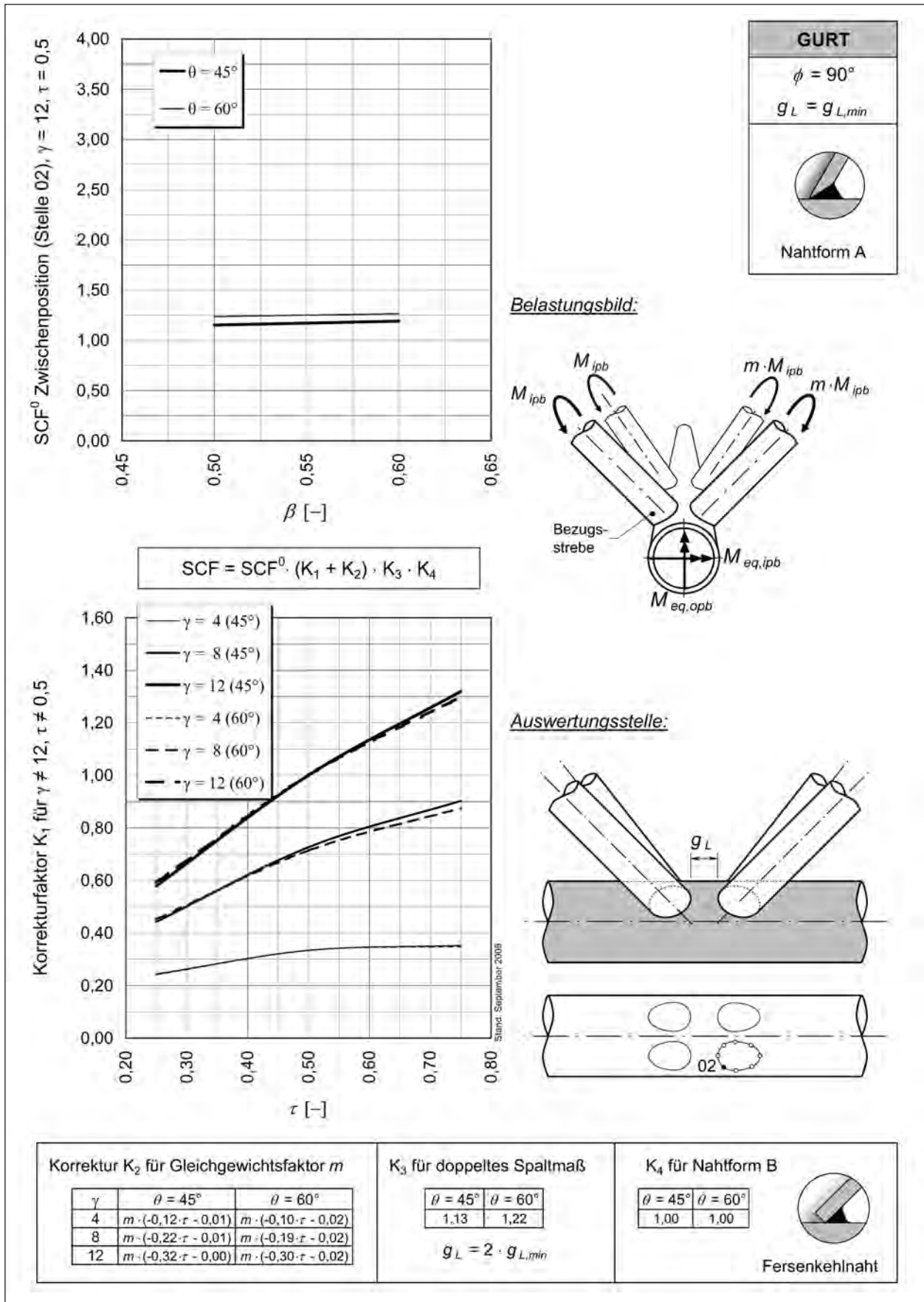
$g_L = 2 \cdot g_{L,min}$

**$K_4$  für Nahtform B**

$\theta = 45^\circ$	$\theta = 60^\circ$
1,00	1,00

Fersenkehlnaht

Bild 3-69: SCF<sub>ipb,br</sub> für Lastfall 107, 108, 109 (unausgeglichene Strebenbiegung in der Ebene der Fachwerkwand), Kronenspitze (01), Gurt



**Bild 3-70:** SCF<sub>ipb,br</sub> für Lastfall 107, 108, 109 (unausgeglichene Strebenbiegung in der Ebene der Fachwerkwand), Zwischenposition (02), Gurt

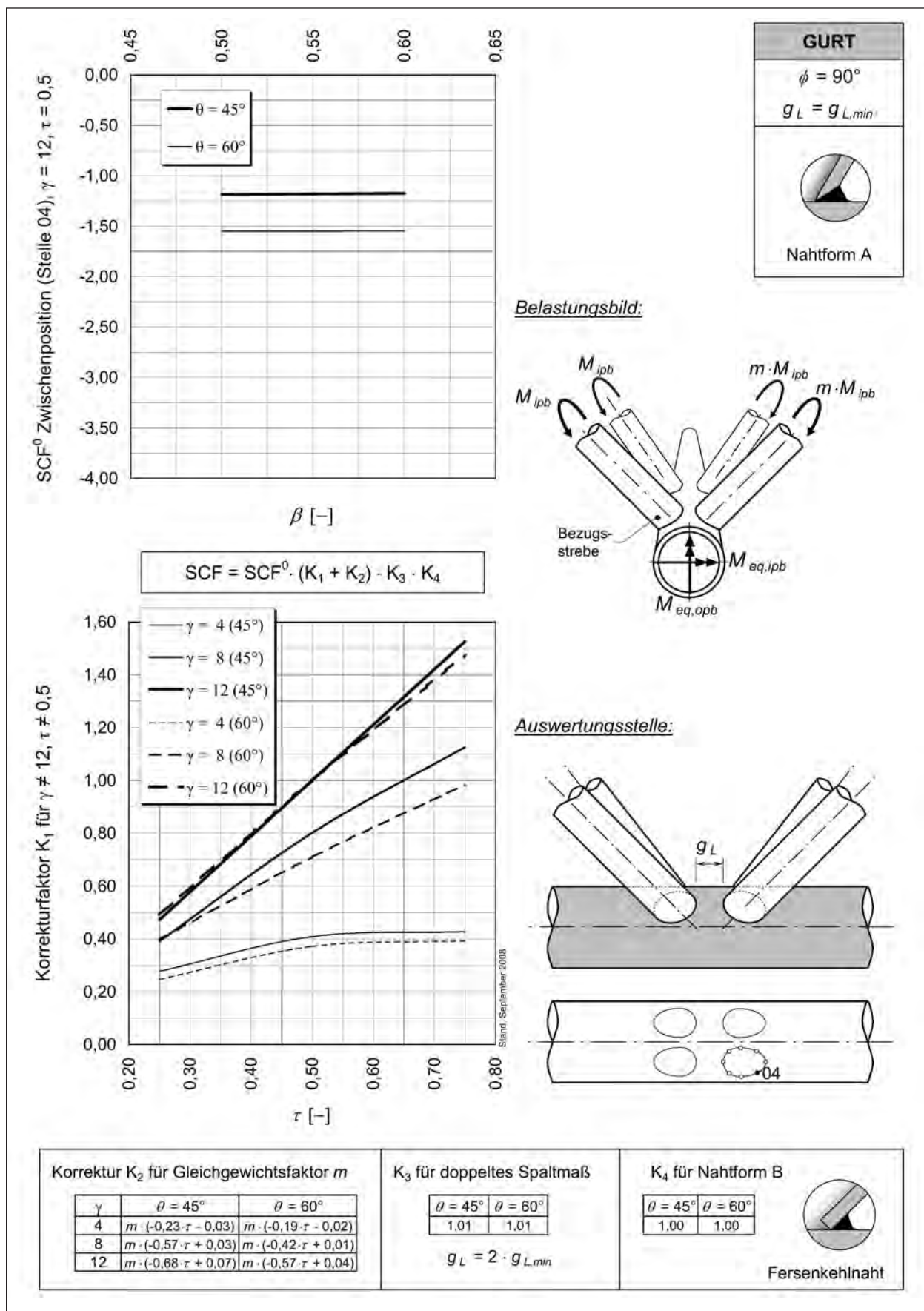
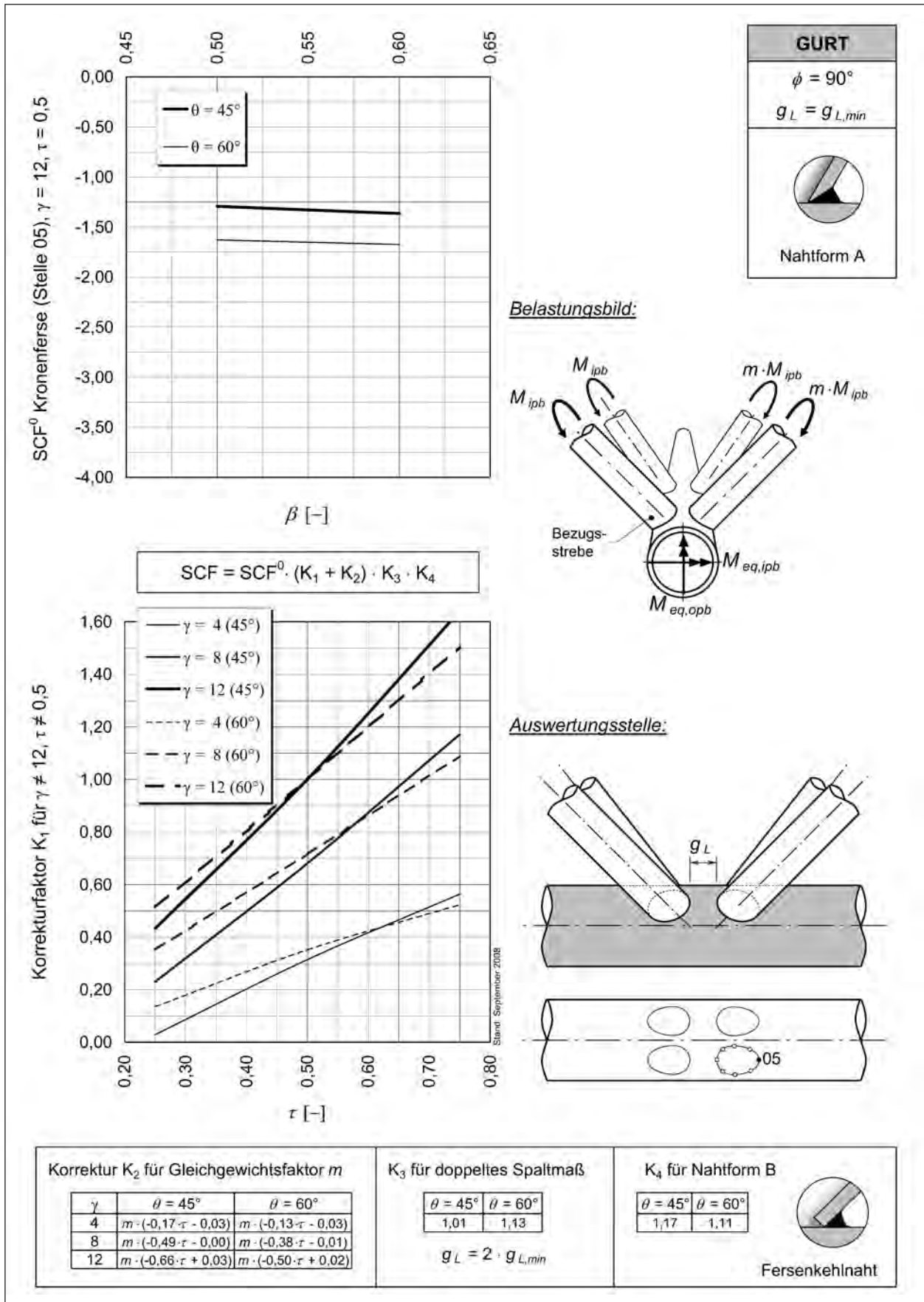
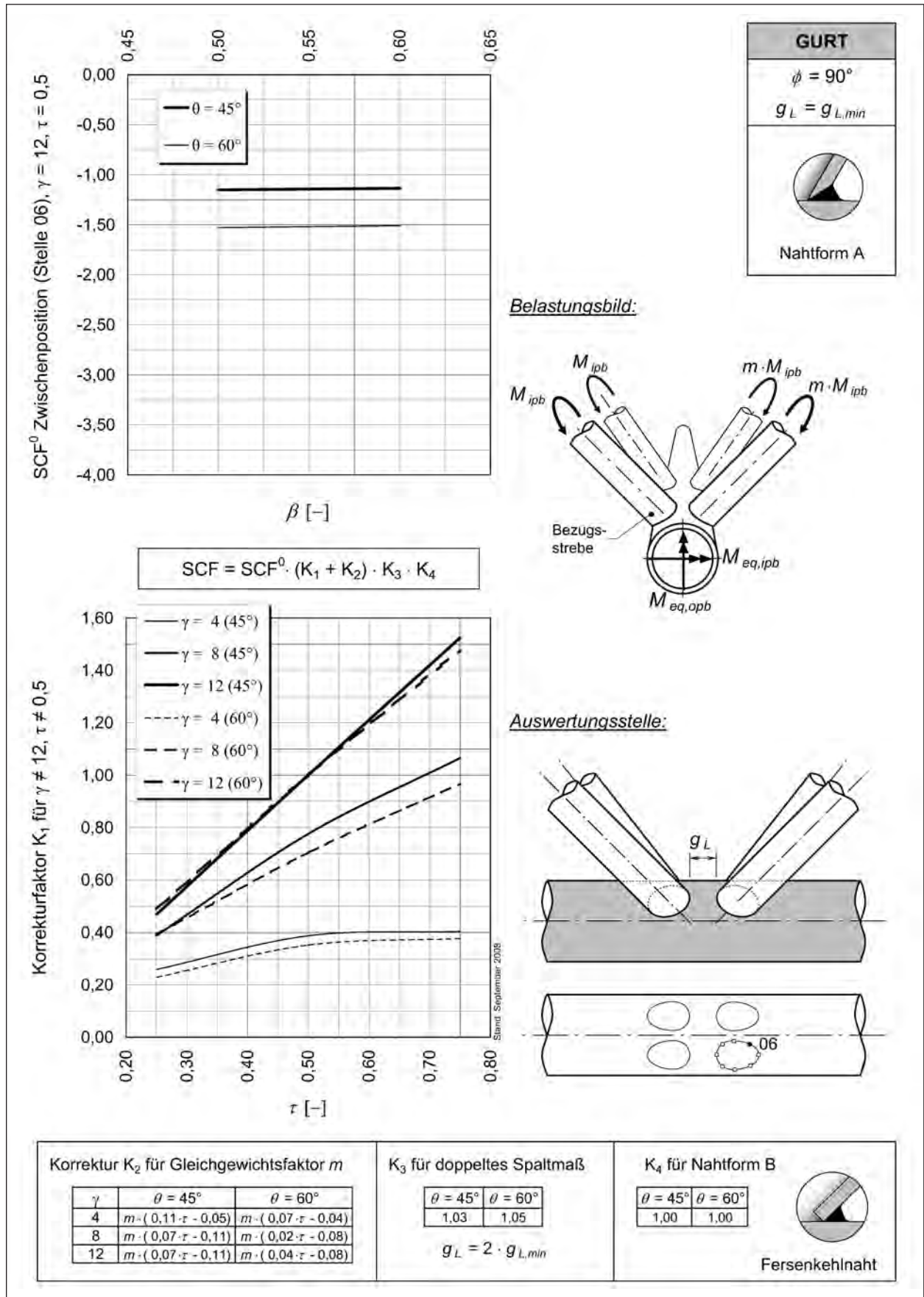


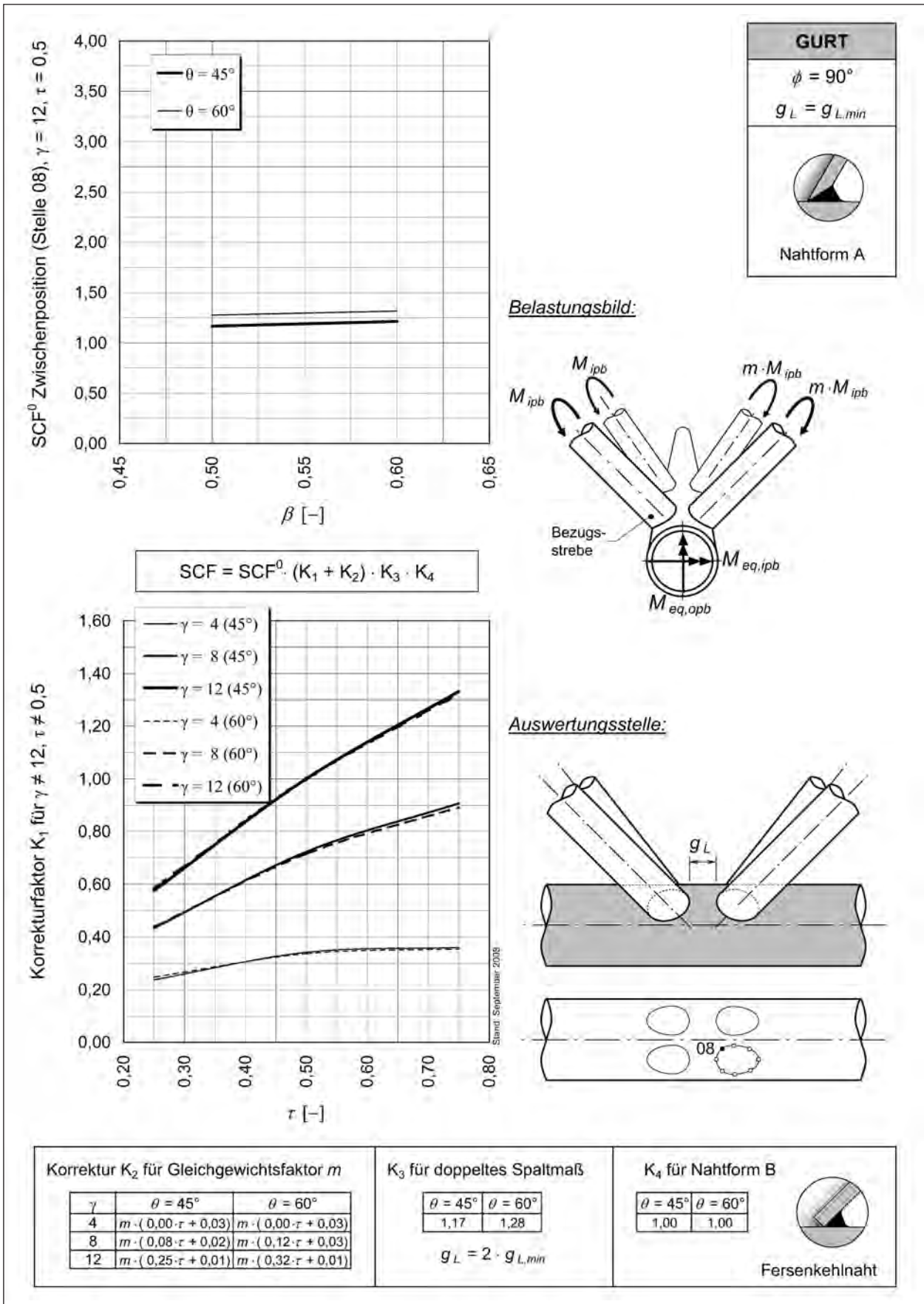
Bild 3-71: SCF<sub>ipb,br</sub> für Lastfall 107, 108, 109 (unausgeglichene Strebenbiegung in der Ebene der Fachwerkwand), Zwischenposition (04), Gurt



**Bild 3-72:**  $SCF_{ipb,br}$  für Lastfall 107, 108, 109 (unausgeglichene Strebenbiegung in der Ebene der Fachwerkwand), Kronenferse (05), Gurt



**Bild 3-73** SCF<sub>ipb,br</sub> für Lastfall 107, 108, 109 (unausgeglichene Strebenbiegung in der Ebene der Fachwerkwand), Zwischenposition (06), Gurt



**Bild 3-74:** SCF<sub>ipb,br</sub> für Lastfall 107, 108, 109 (unausgeglichene Strebenbiegung in der Ebene der Fachwerkwand), Zwischenposition (08), Gurt

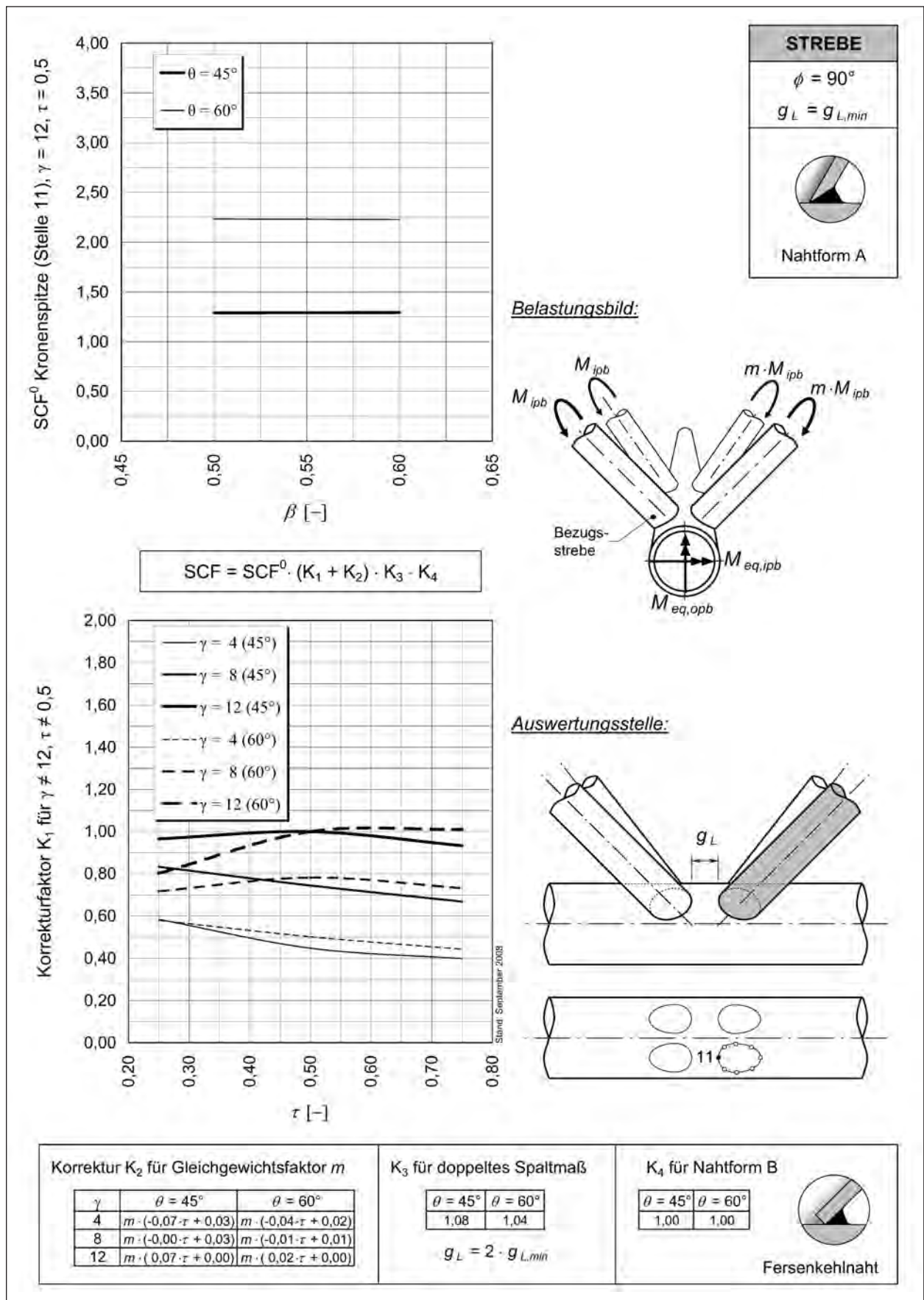
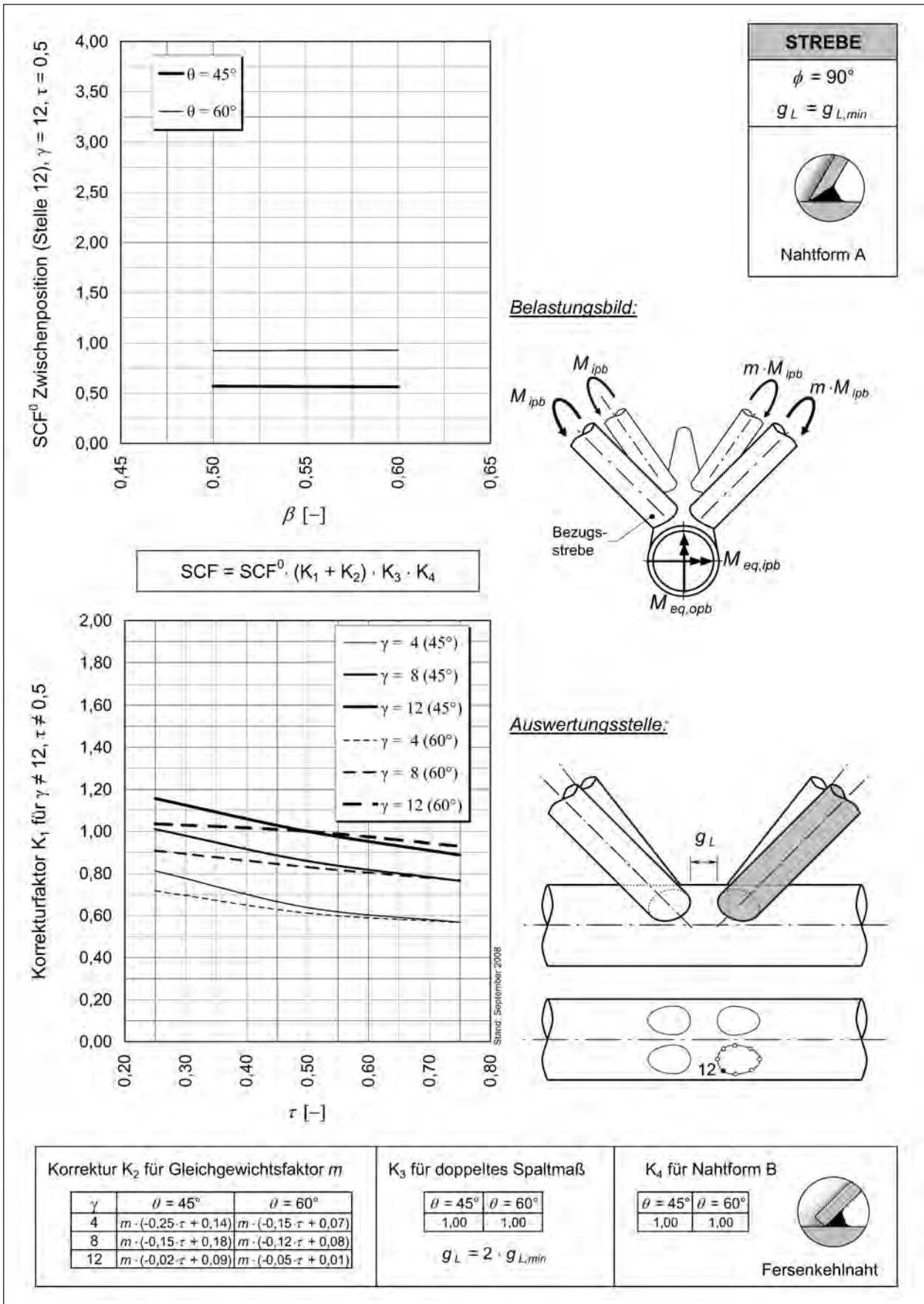


Bild 3-75: SCF<sub>ipb,br</sub> für Lastfall 107, 108, 109 (unausgeglichene Strebenbiegung in der Ebene der Fachwerkwand), Kronenspitze (11), Strebe



**Bild 3-76:** SCF<sub>ipb,br</sub> für Lastfall 107, 108, 109 (unausgeglichene Strebenbiegung in der Ebene der Fachwerkwand), Zwischenposition (12), Strebe



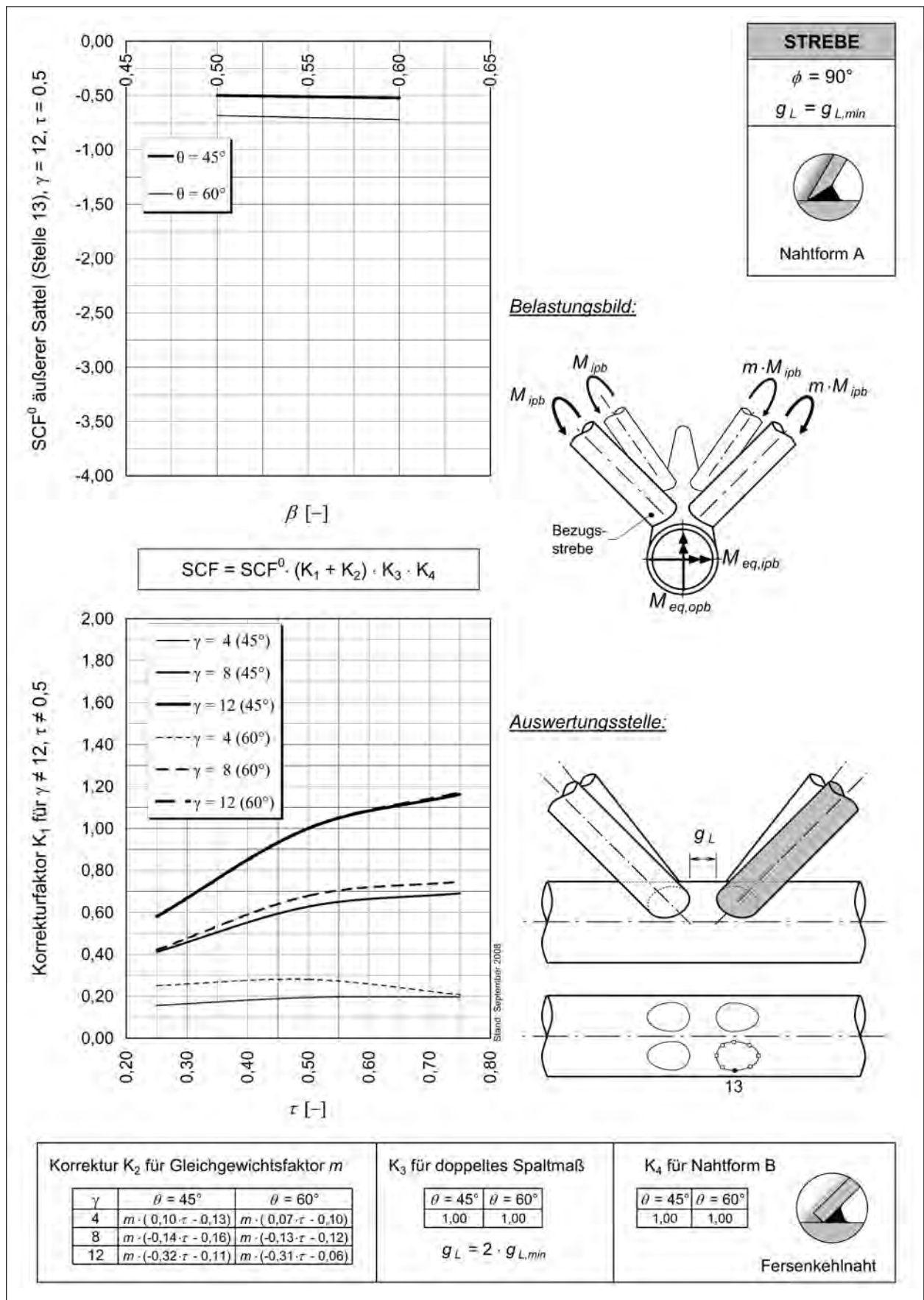
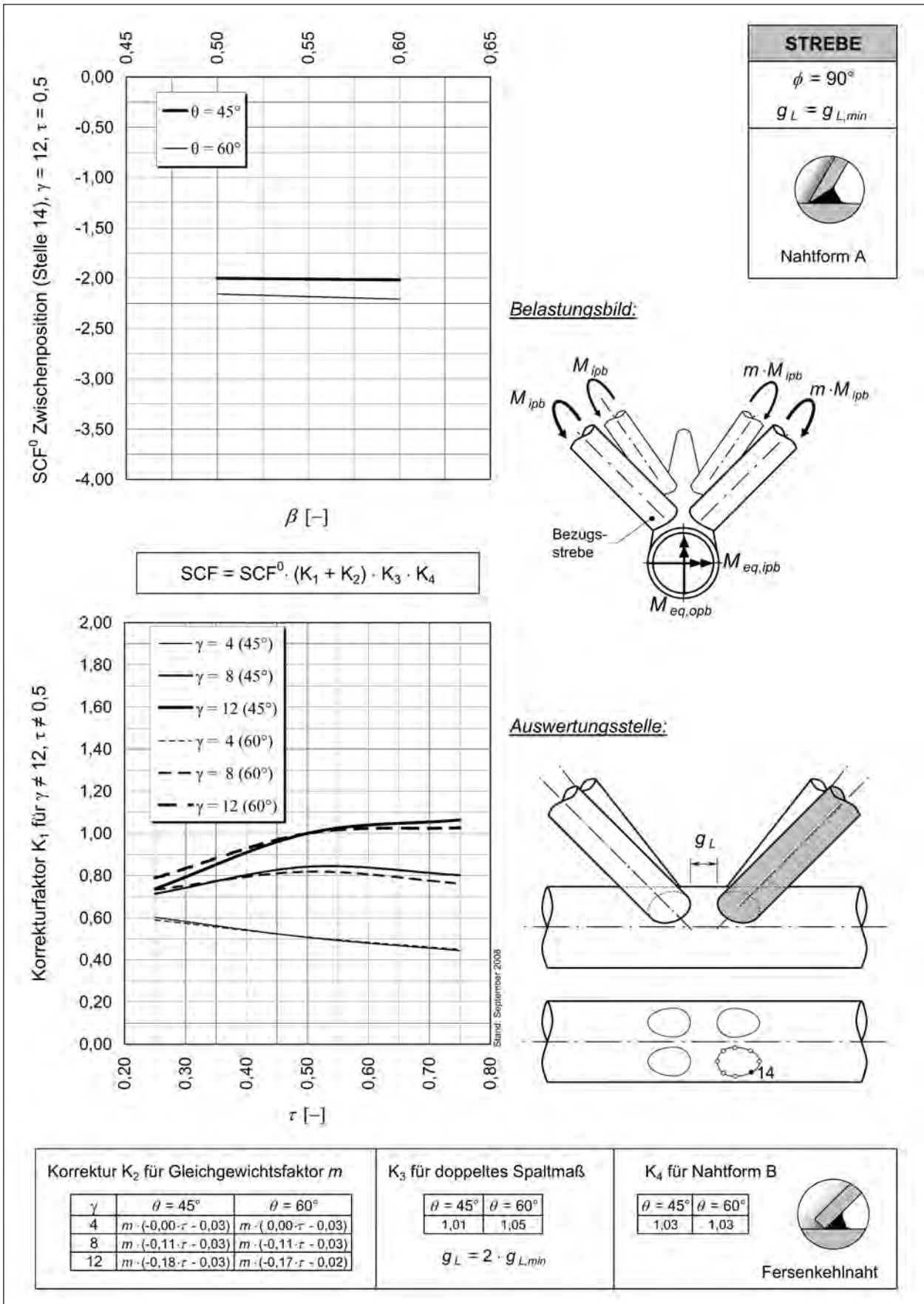
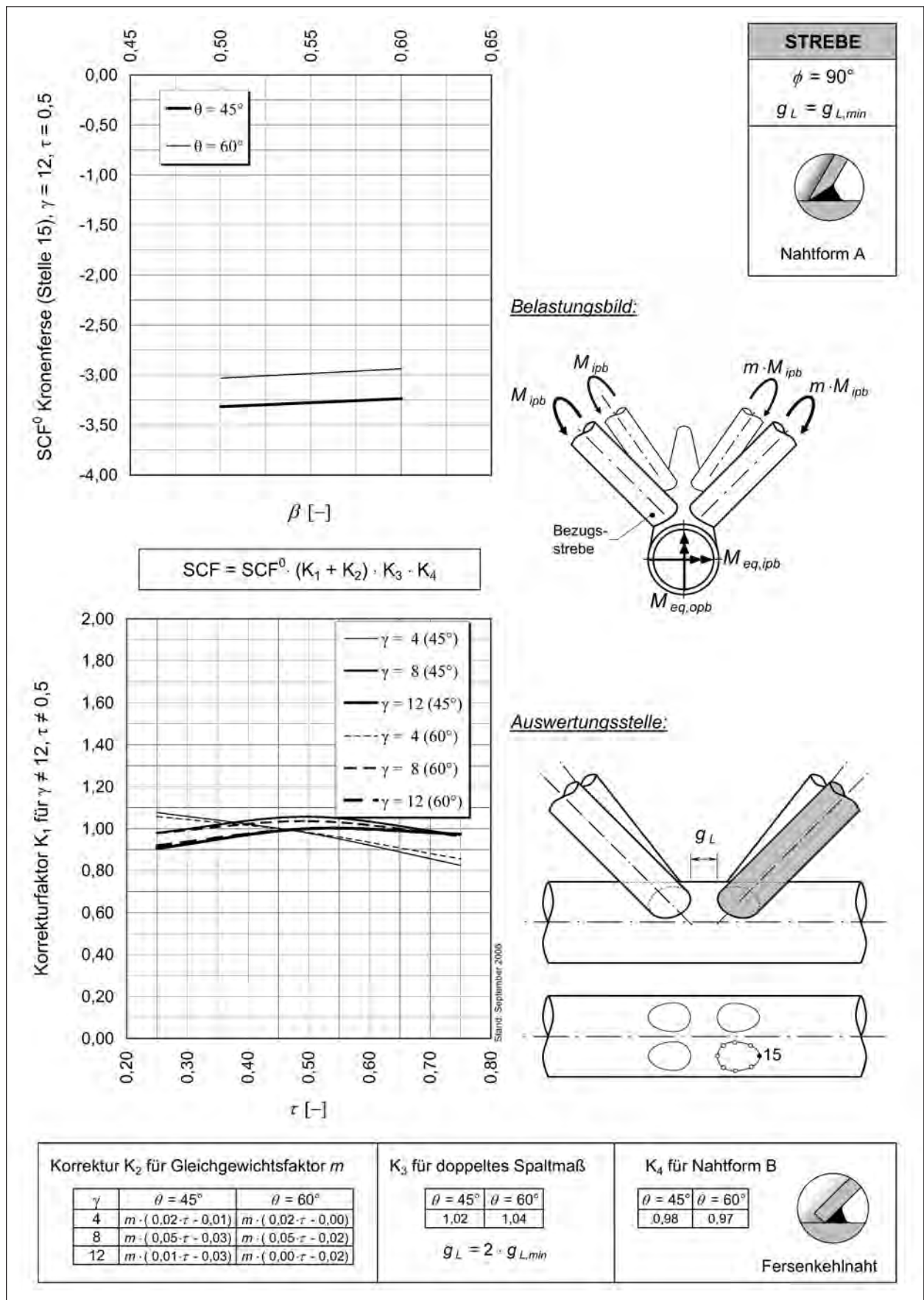


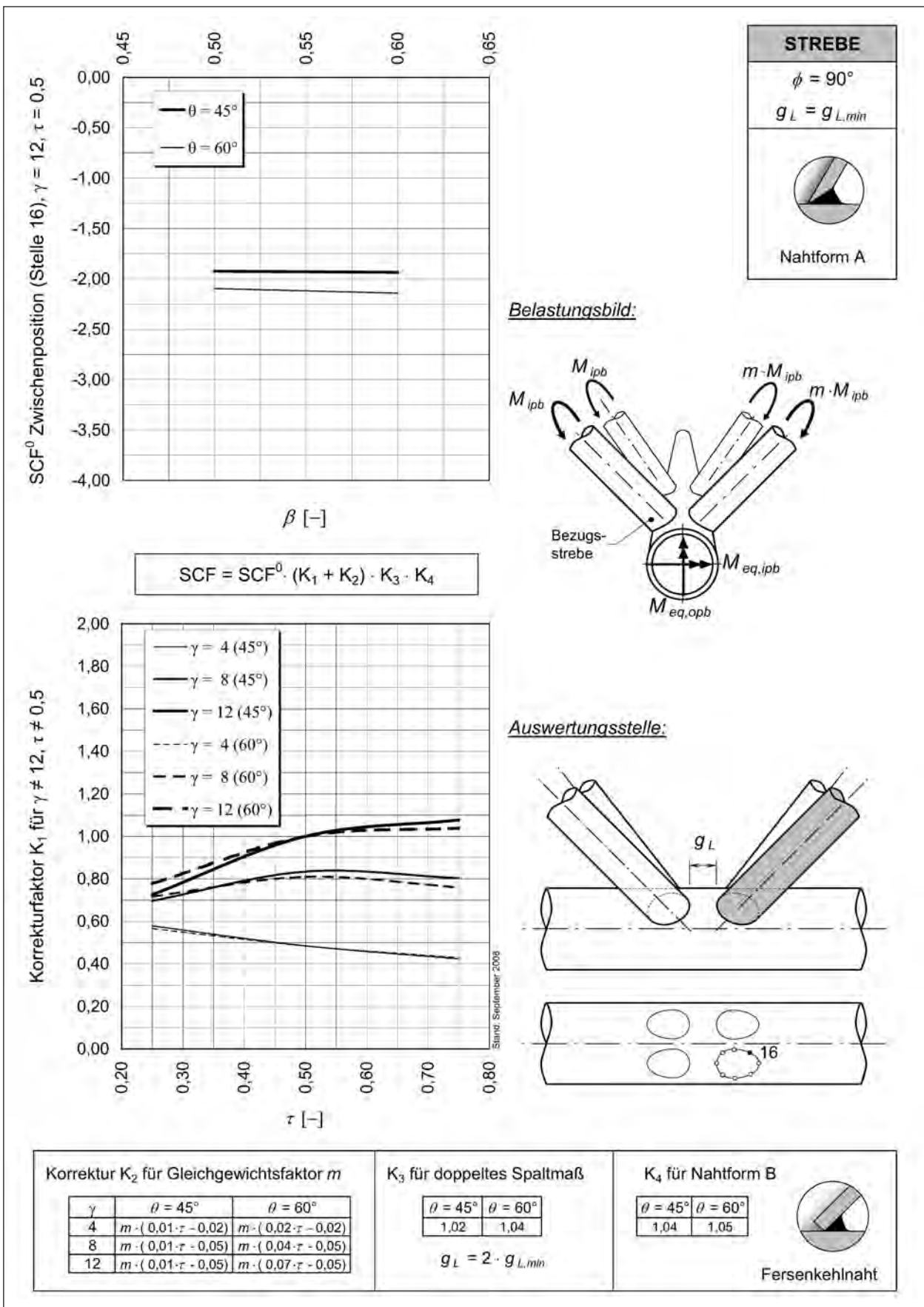
Bild 3-77: SCF<sub>ipb,br</sub> für Lastfall 107, 108, 109 (unausgeglichene Strebenbiegung in der Ebene der Fachwerkwand), äußerer Sattel (13), Strebe



**Bild 3-78:** SCF<sub>ipb,br</sub> für Lastfall 107, 108, 109 (unausgeglichene Strebenbiegung in der Ebene der Fachwerkwand), Zwischenposition (14), Strebe



**Bild 3-79:** SCF<sub>ipb,br</sub> für Lastfall 107, 108, 109 (unausgeglichene Strebenbiegung in der Ebene der Fachwerkwand), Kronenferse (15), Strebe



**Bild 3-80:** SCF<sub>ipb,br</sub> für Lastfall 107, 108, 109 (unausgeglichene Strebenbiegung in der Ebene der Fachwerkwand), Zwischenposition (16), Strebe

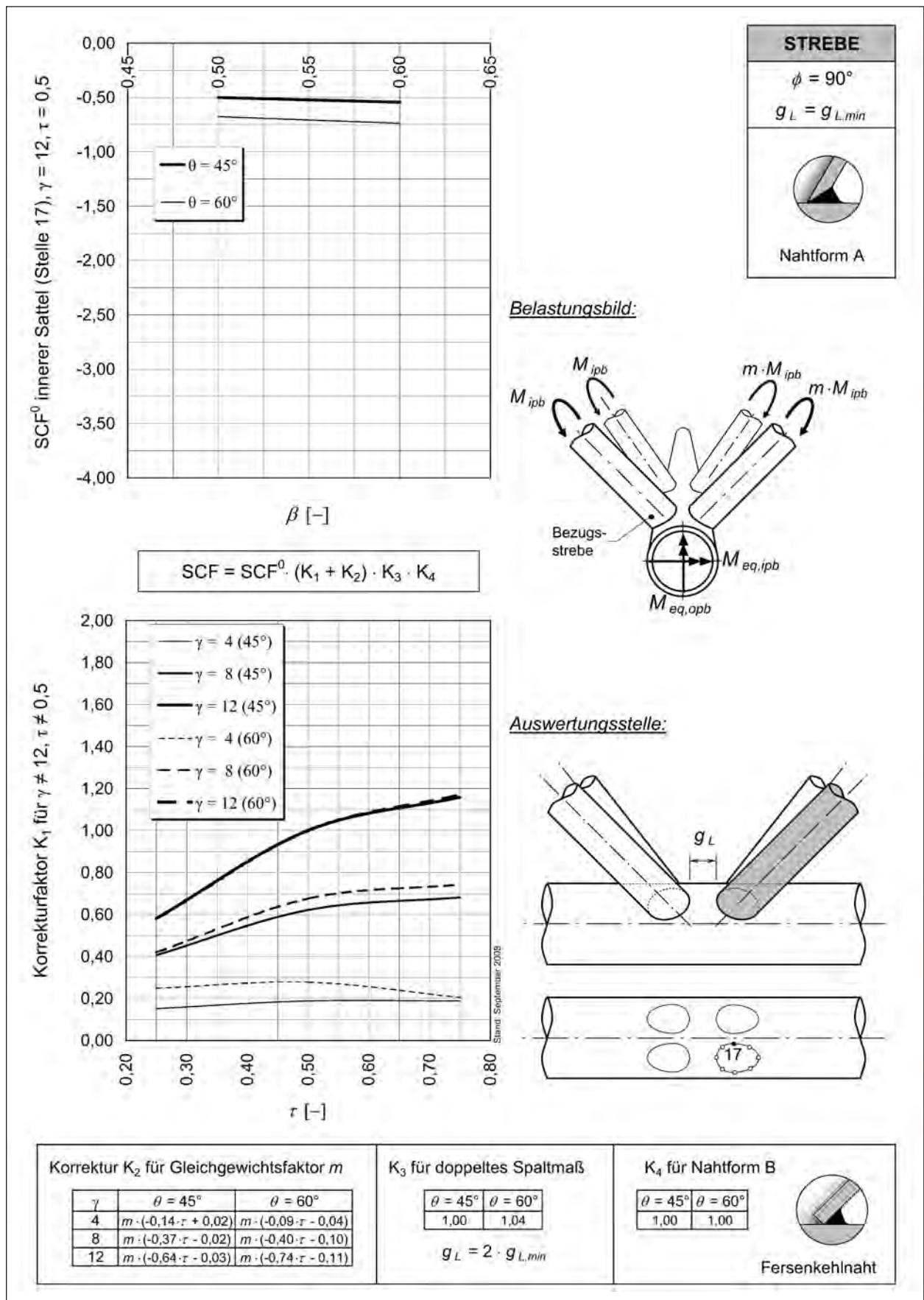
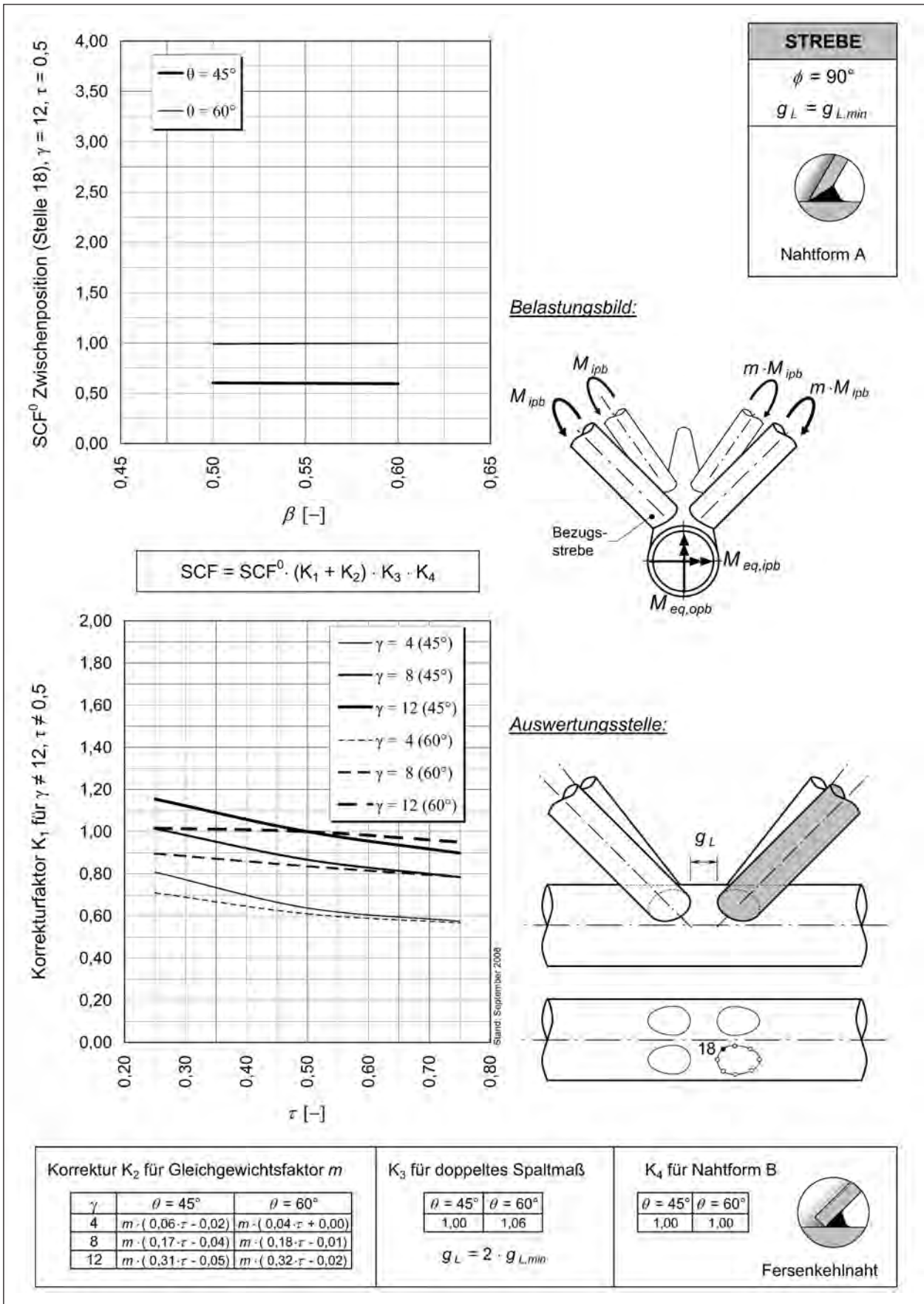


Bild 3-81: SCF<sub>ipb,br</sub> für Lastfall 107, 108, 109 (unausgeglichene Strebenbiegung in der Ebene der Fachwerkwand), innerer Sattel (17), Strebe



**Bild 3-82:** SCF<sub>ipb,br</sub> für Lastfall 107, 108, 109 (unausgeglichene Strebenbiegung in der Ebene der Fachwerkwand), Zwischenposition (18), Strebe

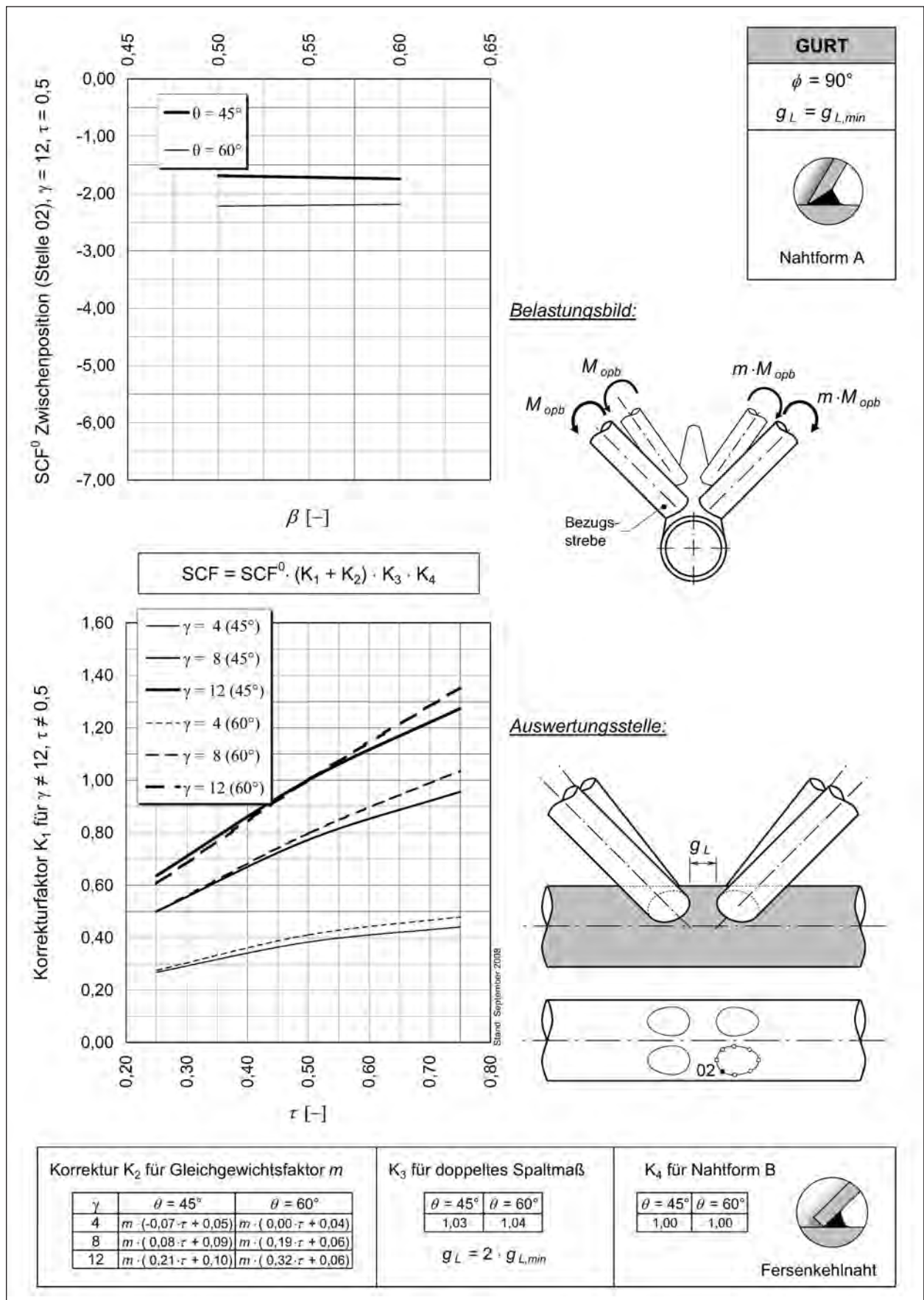


Bild 3-83: SCF<sub>opb,br</sub> für Lastfall 10, 11, 12 (unausgeglichene Strebenbiegung aus Fachwerkwand), Zwischenposition (02), Gurt

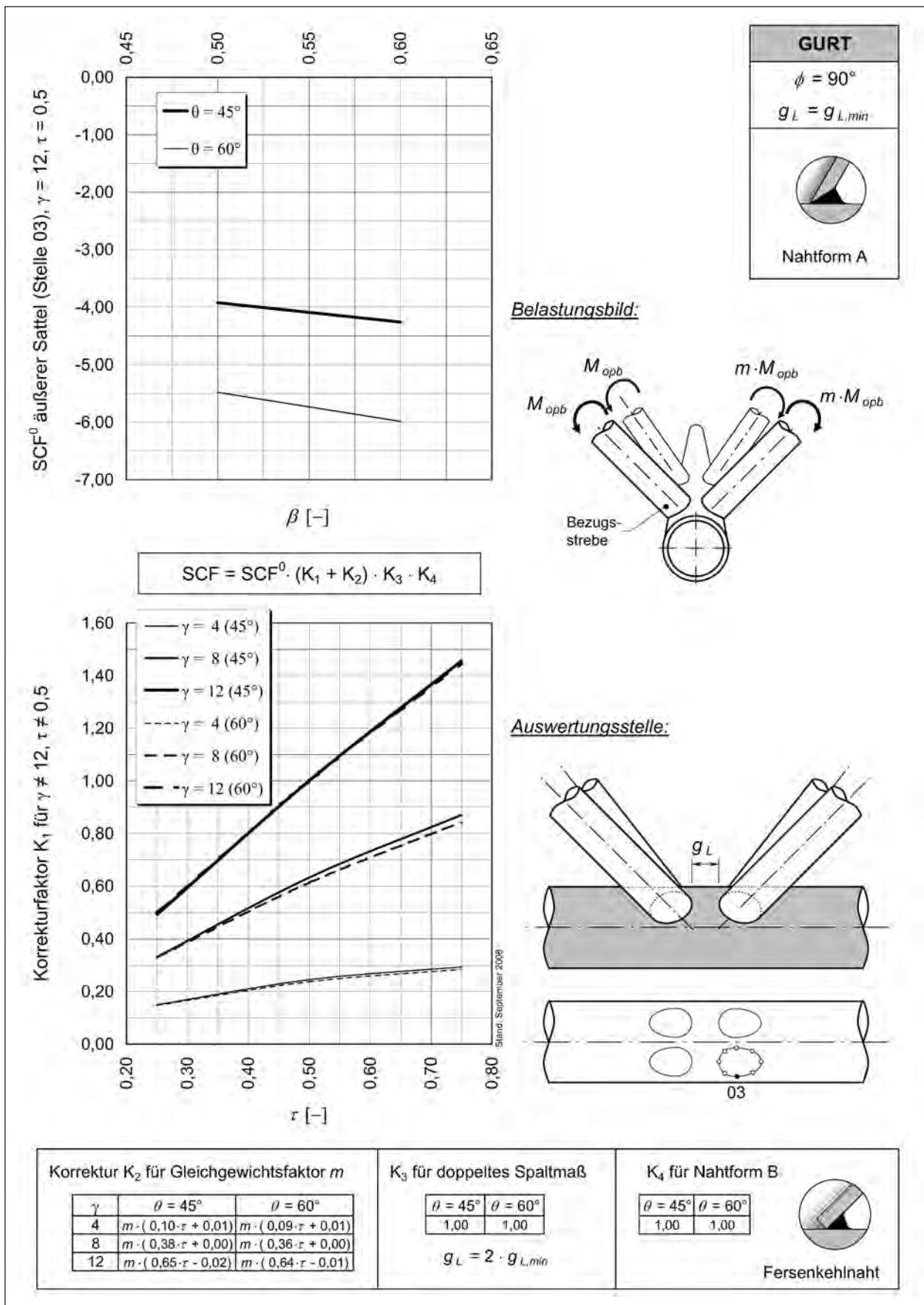


Bild 3-84: SCF<sub>opb,br</sub> für Lastfall 10, 11, 12 (unausgeglichene Strebenbiegung aus Fachwerkwand), äußerer Sattel (03), Gurt



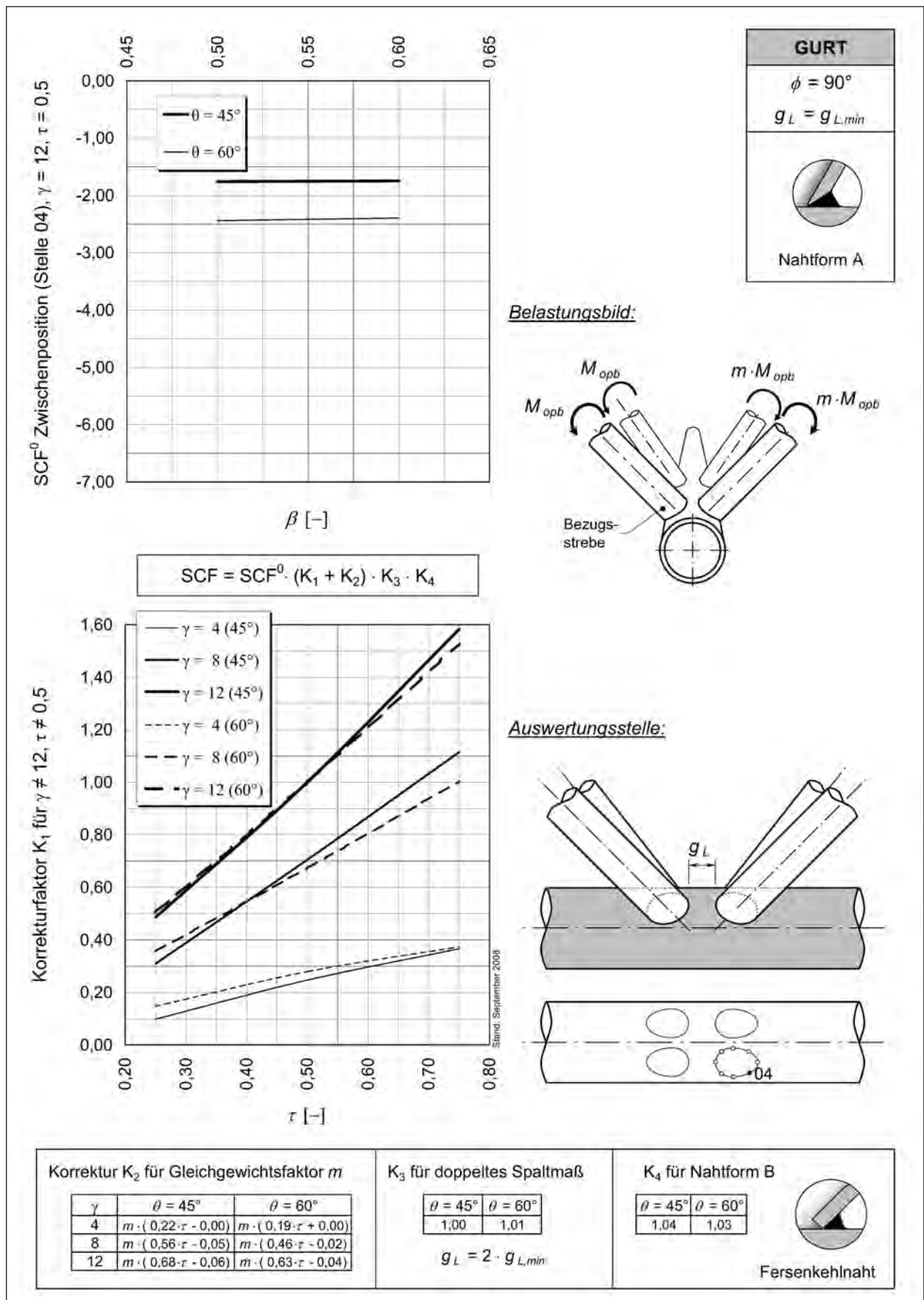
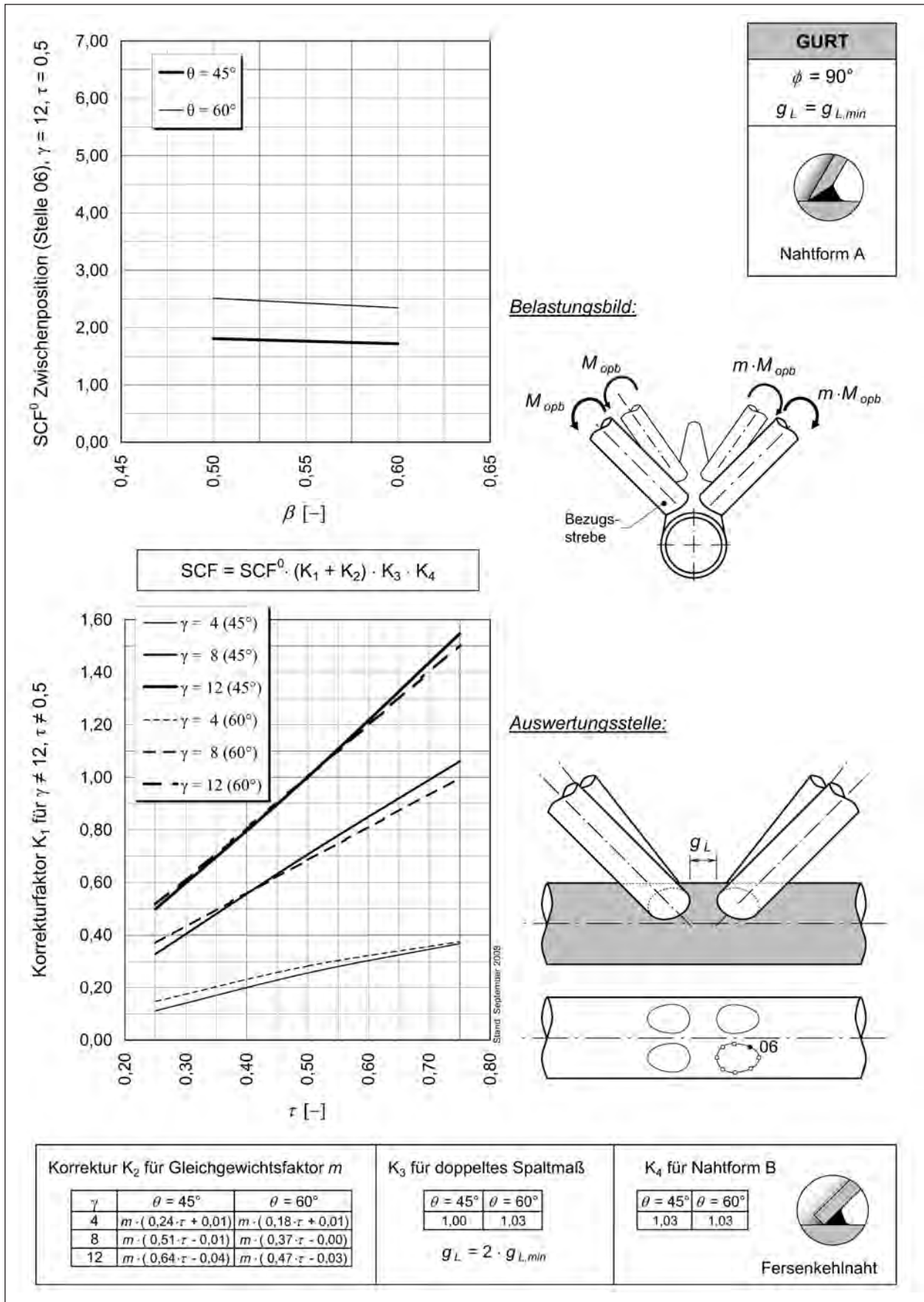


Bild 3-85: SCF<sub>opb,br</sub> für Lastfall 10, 11, 12 (unausgeglichene Strebenbiegung aus Fachwerkwand), Zwischenposition (04), Gurt



**Bild 3-86:** SCF<sub>opb,br</sub> für Lastfall 10, 11, 12 (unausgeglichene Strebenbiegung aus Fachwerkwand), Zwischenposition (06), Gurt

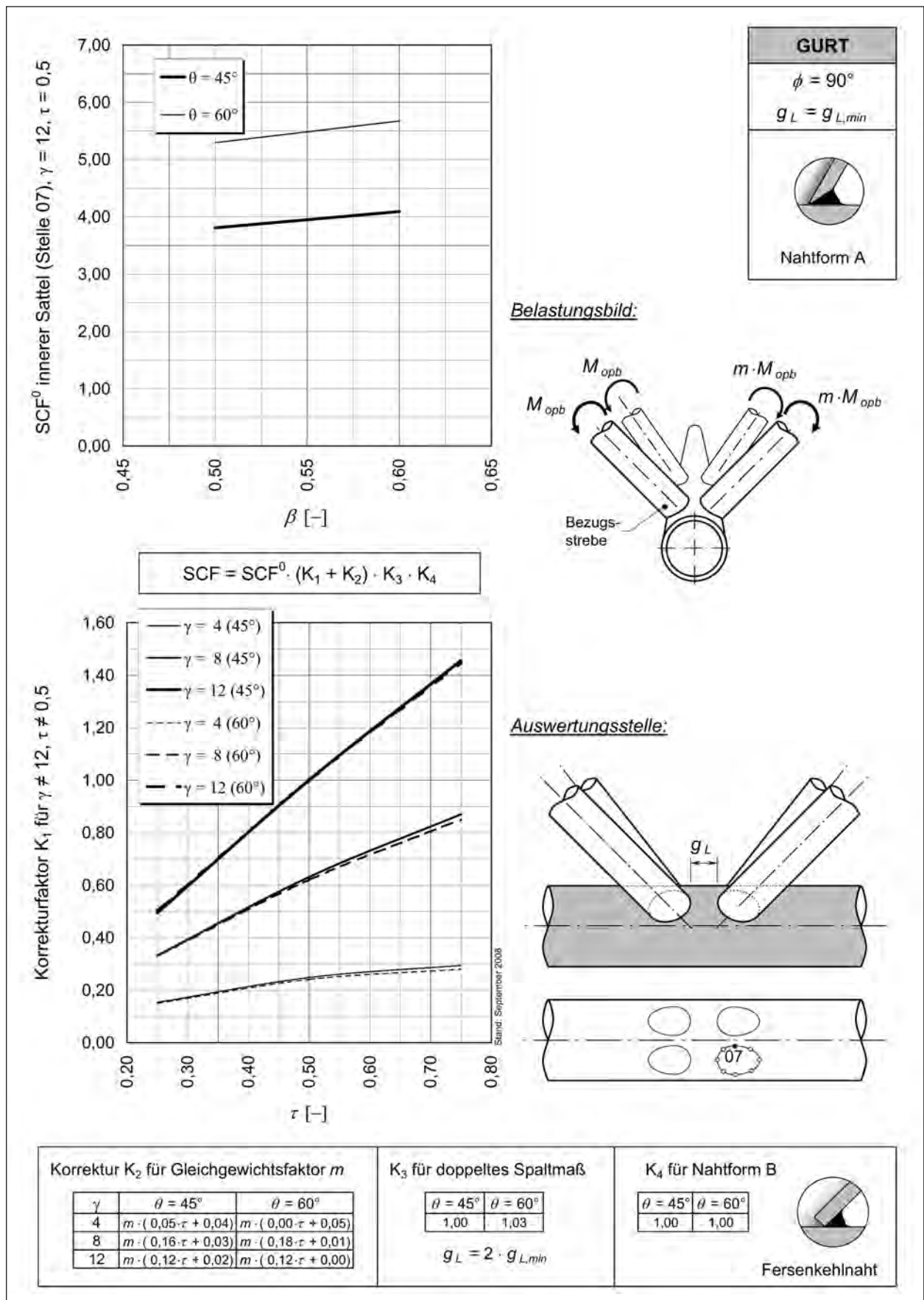
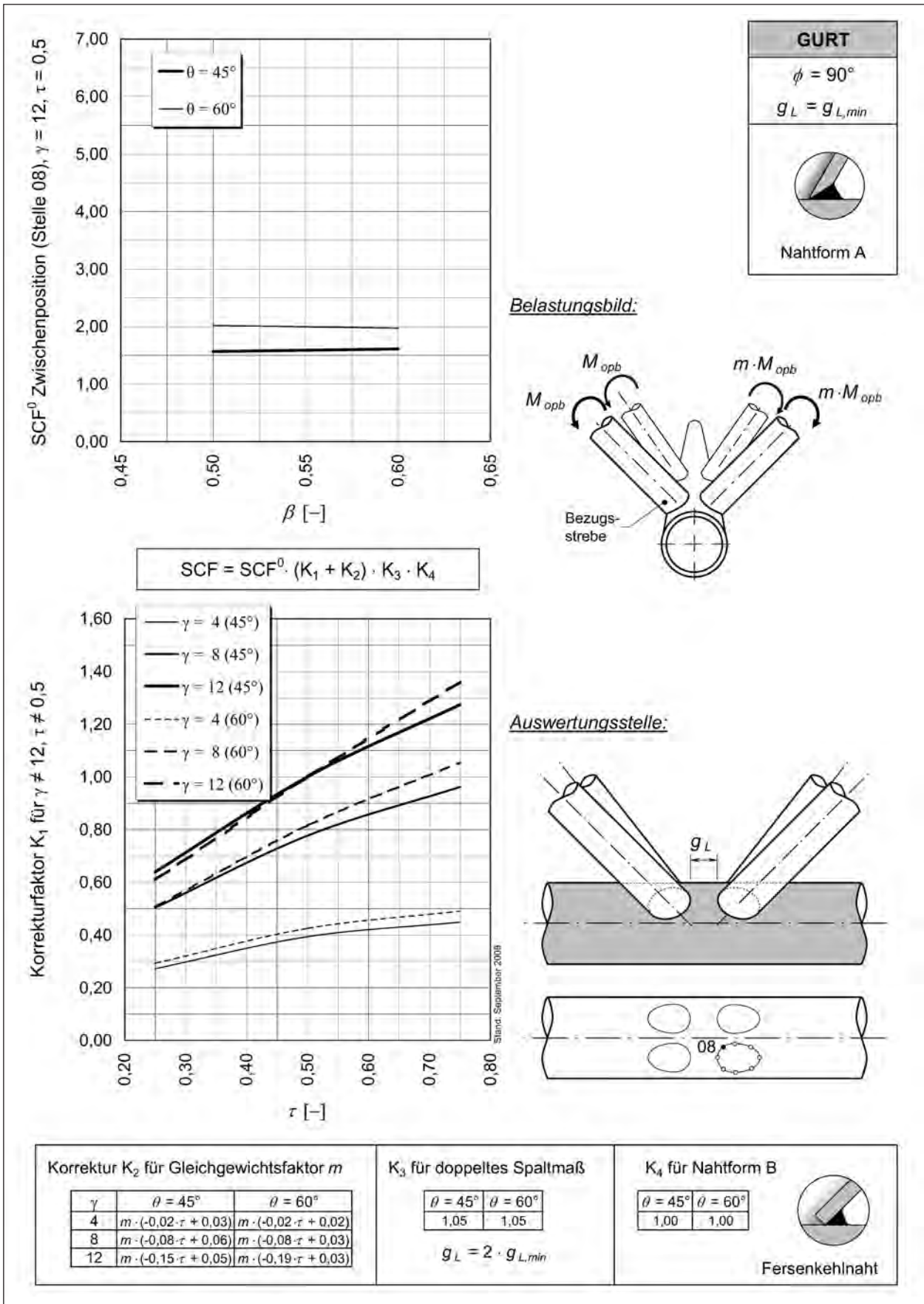


Bild 3-87: SCF<sub>opb,br</sub> für Lastfall 10, 11, 12 (unausgeglichene Strebenbiegung aus Fachwerkwand), innerer Sattel (07), Gurt



**Bild 3-88:** SCF<sub>opb,br</sub> für Lastfall 10, 11, 12 (unausgeglichene Strebenbiegung aus Fachwerkwand), Zwischenposition (08), Gurt

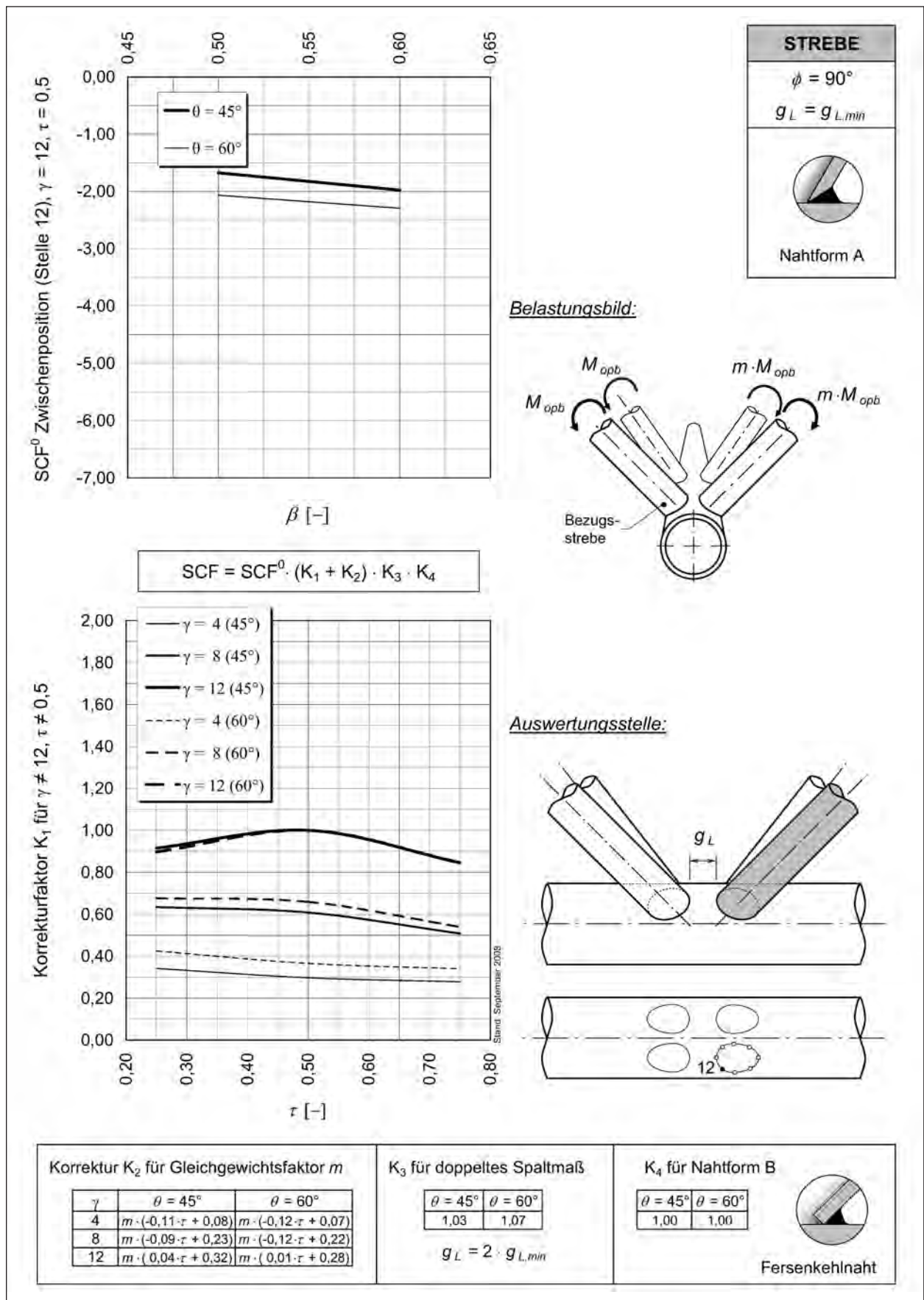


Bild 3-89: SCF<sub>Opb,br</sub> für Lastfall 10, 11, 12 (unausgeglichene Strebenbiegung aus Fachwerkwand), Zwischenposition (12), Strebe

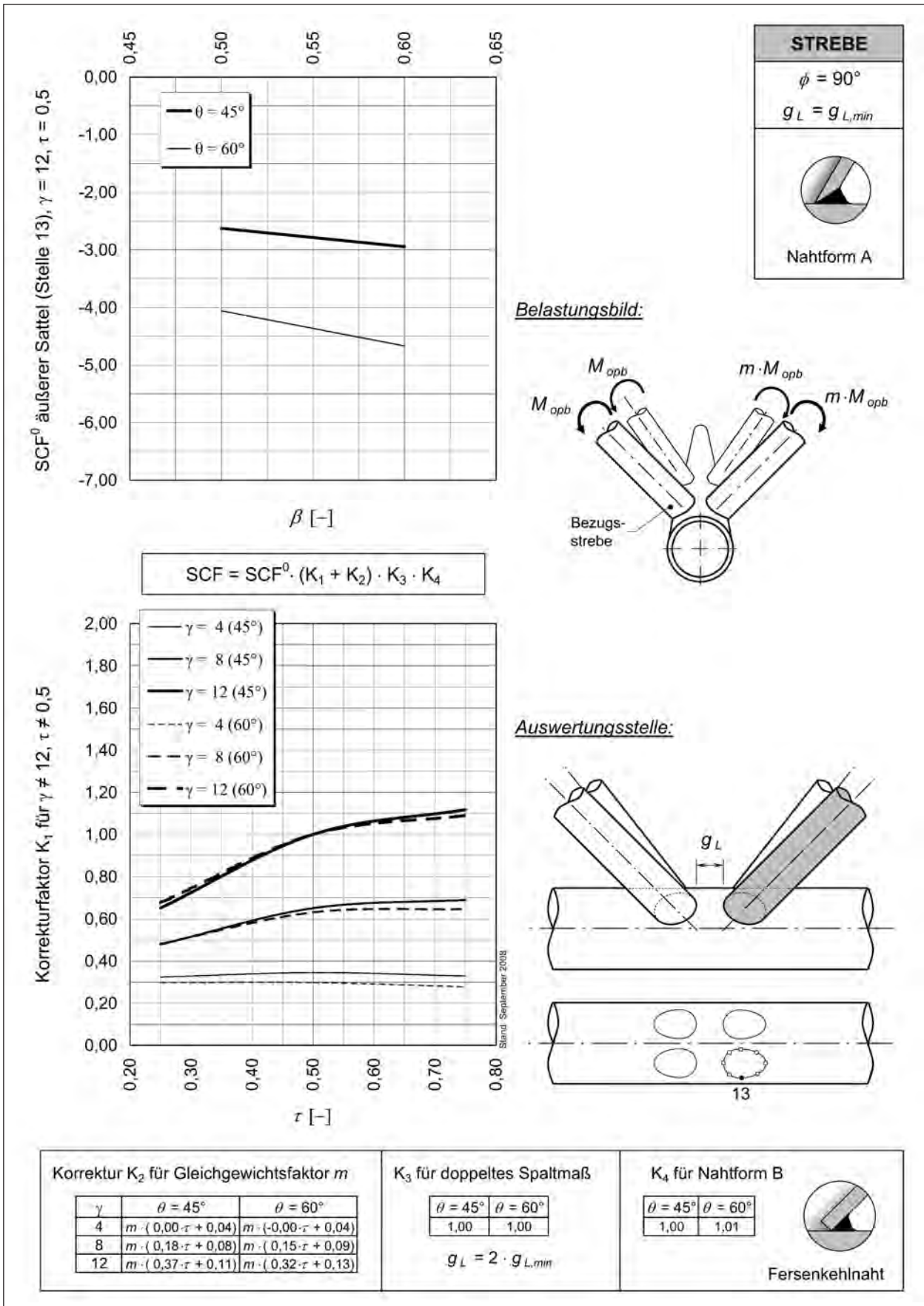


Bild 3-90: SCF<sub>opb,br</sub> für Lastfall 10, 11, 12 (unausgeglichene Strebenbiegung aus Fachwerkwand), äußerer Sattel (13), Strebe

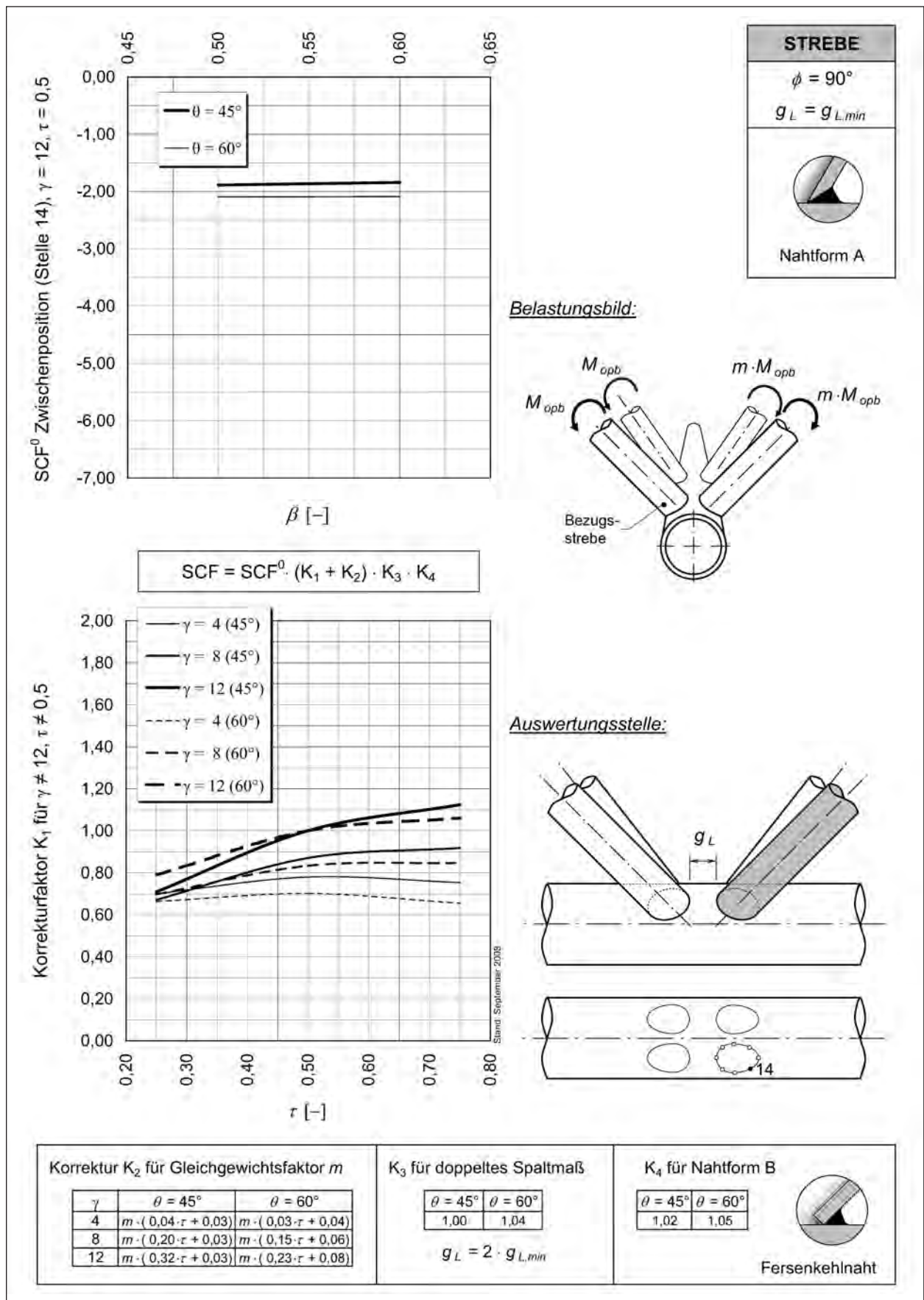


Bild 3-91: SCF<sub>opb,br</sub> für Lastfall 10, 11, 12 (unausgeglichene Strebenbiegung aus Fachwerkwand), Zwischenposition (14), Strebe

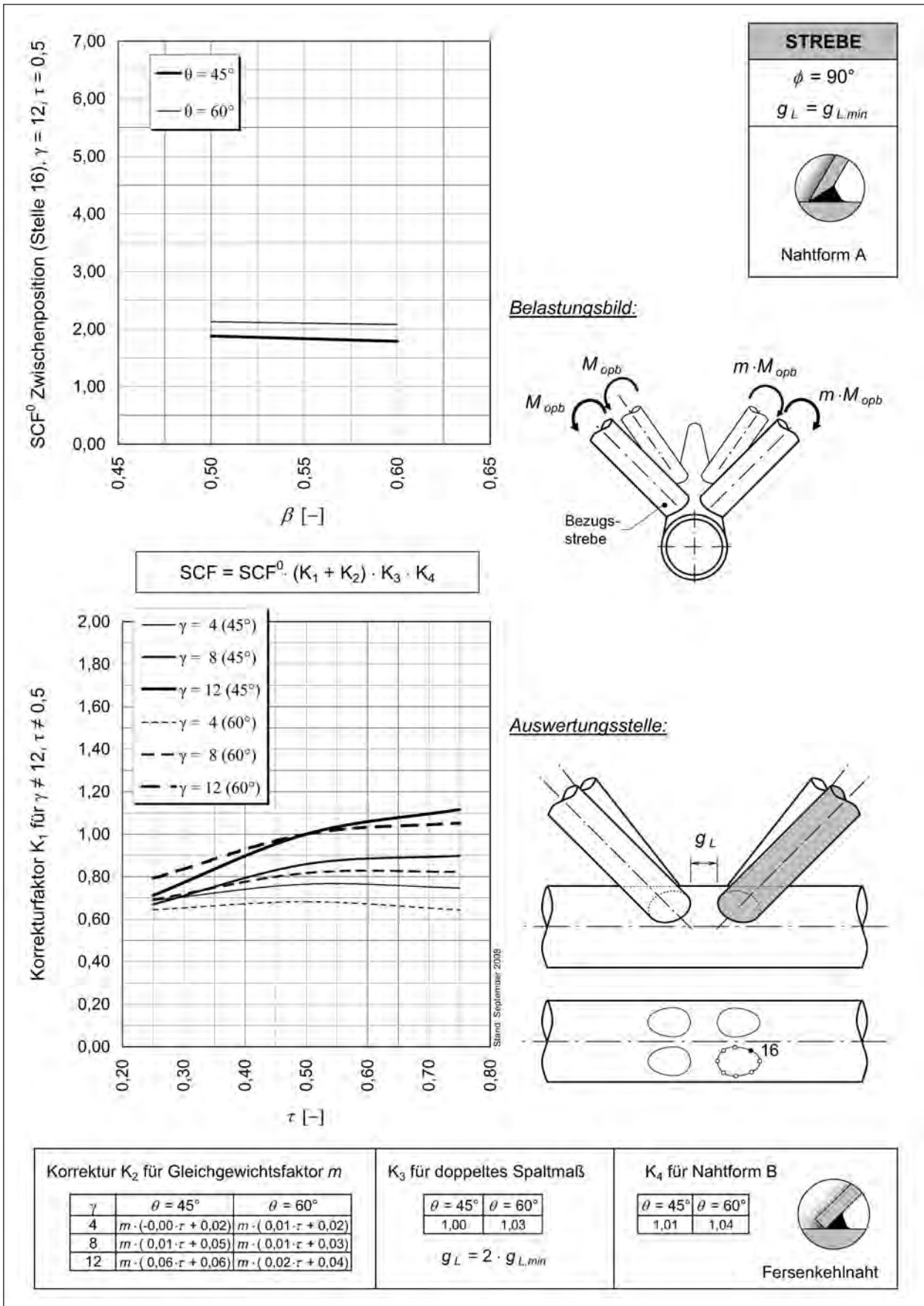


Bild 3-92: SCF<sub>opb,br</sub> für Lastfall 10, 11, 12 (unausgeglichene Strebenbiegung aus Fachwerkwand), Zwischenposition (16), Strebe



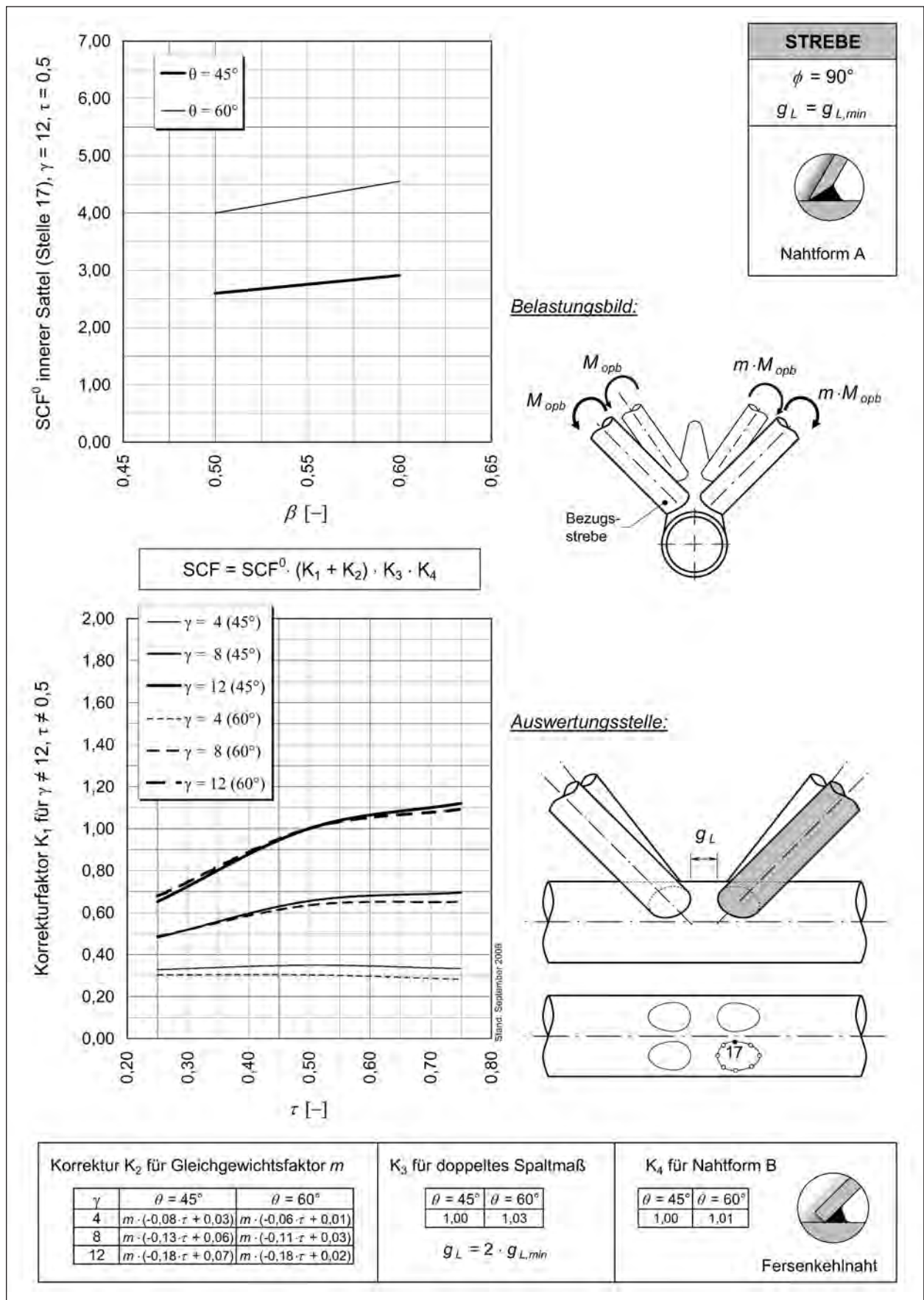
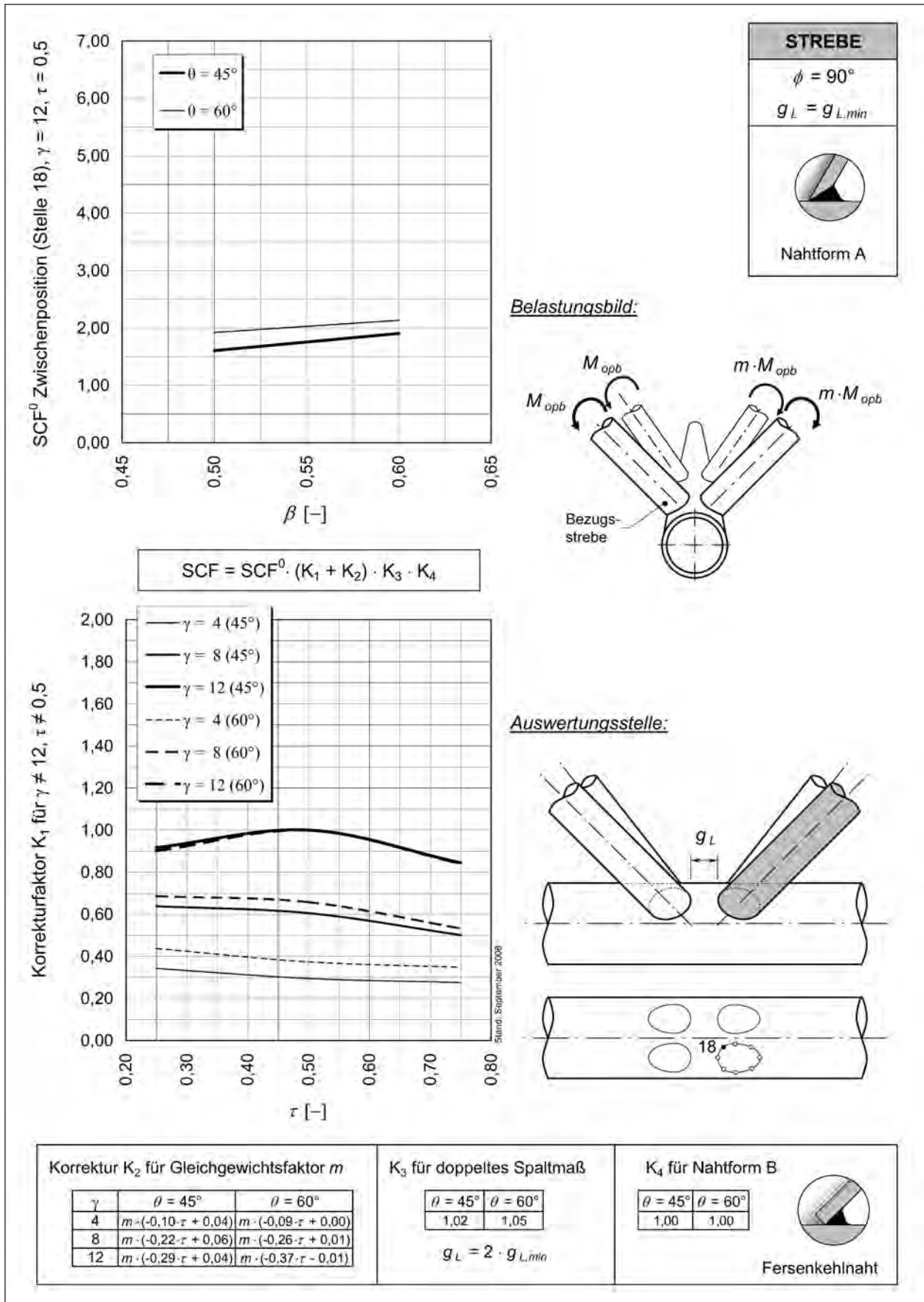


Bild 3-93:  $SCF_{opb,br}$  für Lastfall 10, 11, 12 (unausgeglichene Strebenbiegung aus Fachwerkwand), innerer Sattel (17), Strebe



**Bild 3-94:** SCF<sub>opb,br</sub> für Lastfall 10, 11, 12 (unausgeglichene Strebenbiegung aus Fachwerkwand), Zwischenposition (18), Strebe

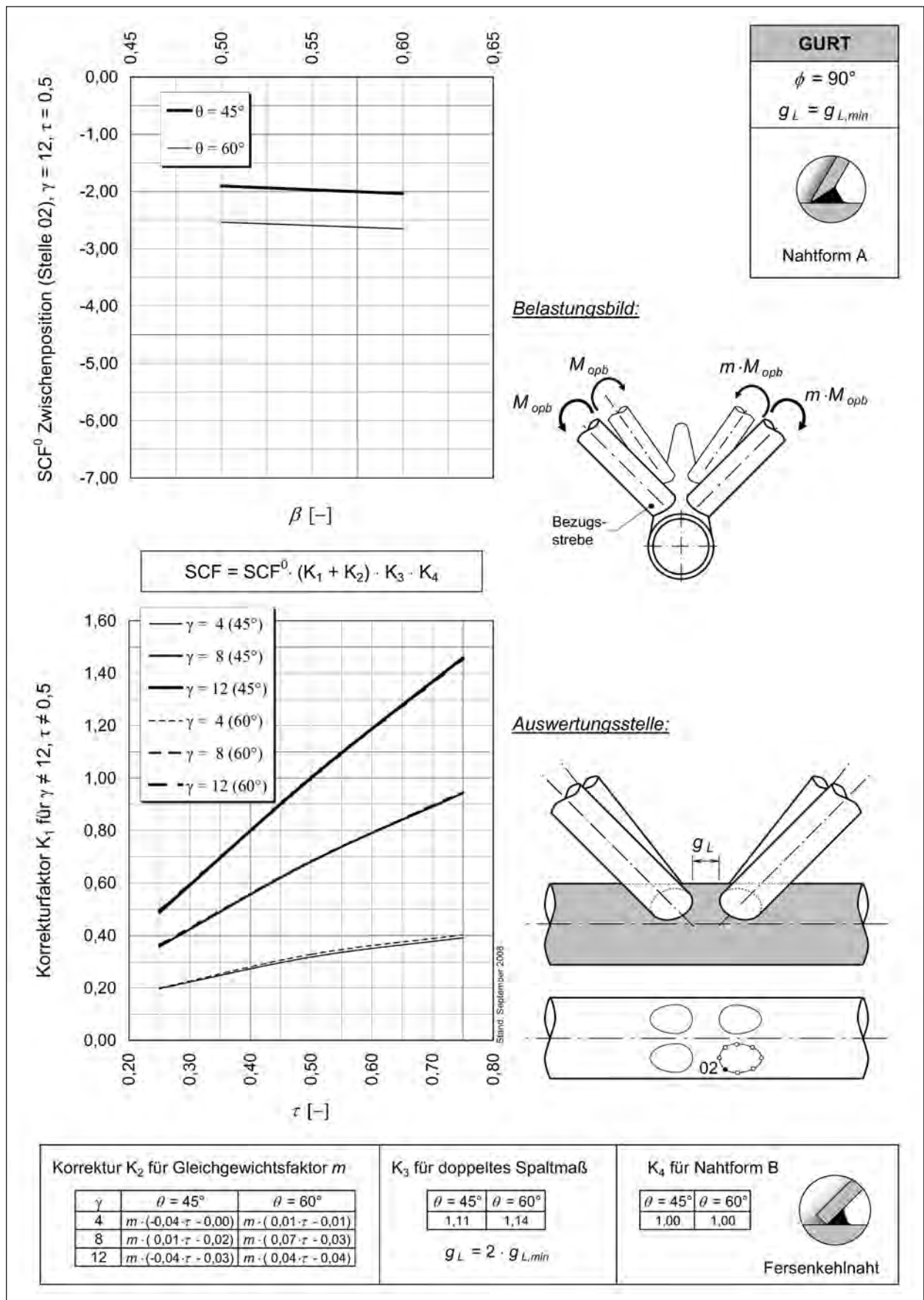


Bild 3-95: SCF<sub>opb,br</sub> für Lastfall 110, 111, 112 (ausgeglichene Strebenbiegung aus Fachwerkwand), Zwischenposition (02), Gurt

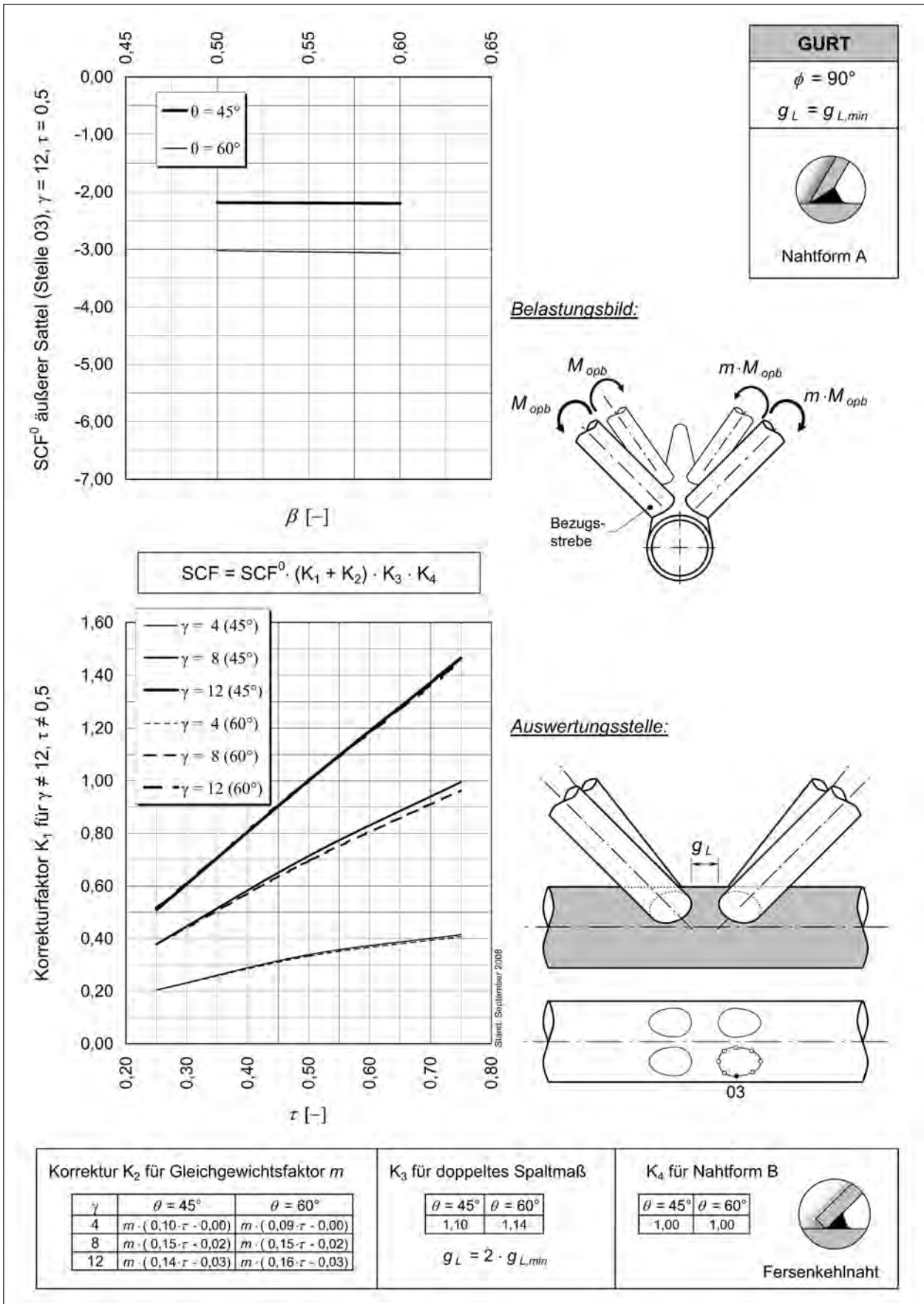


Bild 3-96:  $SCF_{opb,br}$  für Lastfall 110, 111, 112 (ausgeglichene Strebenbiegung aus Fachwerkwand), äußerer Sattel (03), Gurt

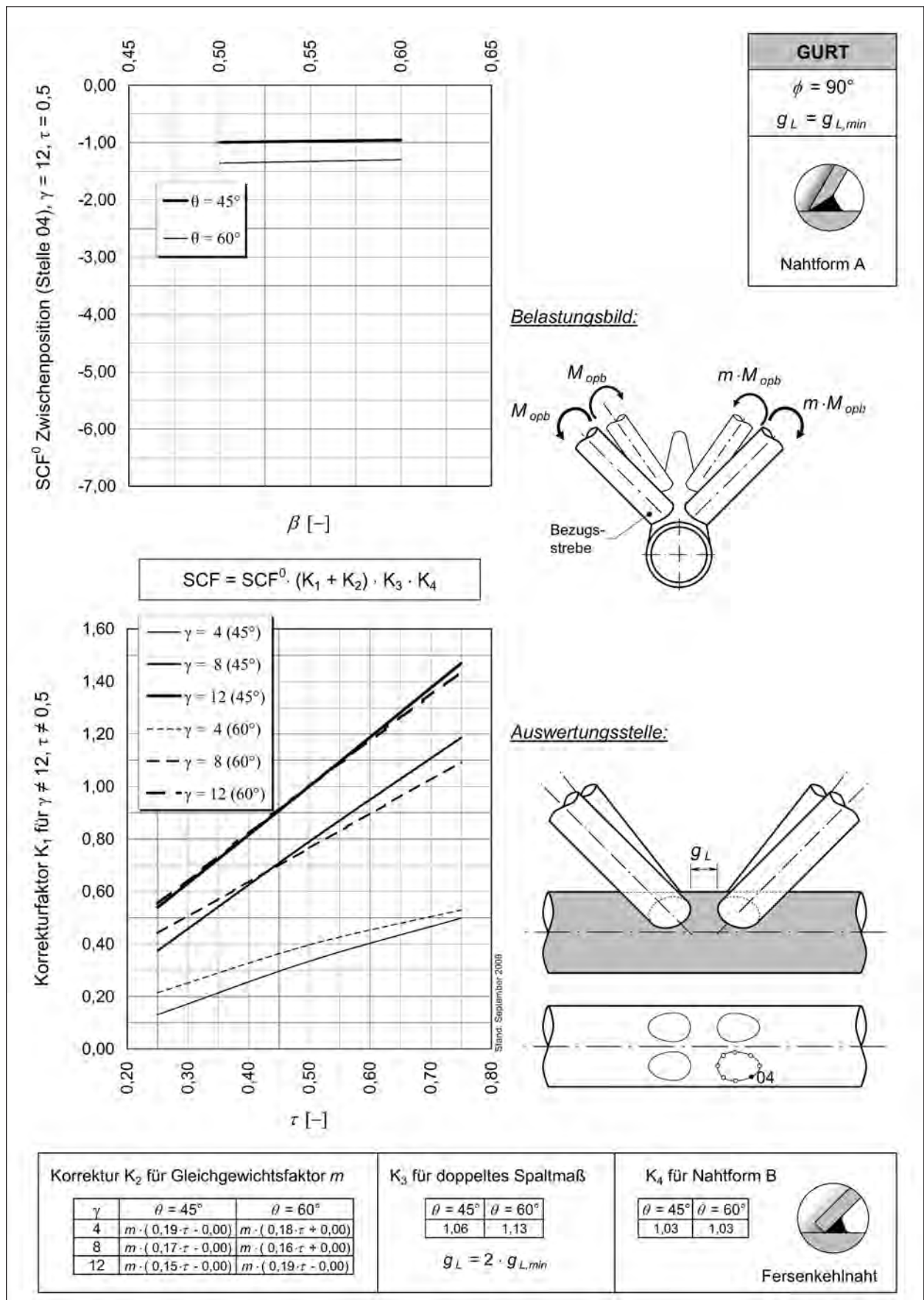
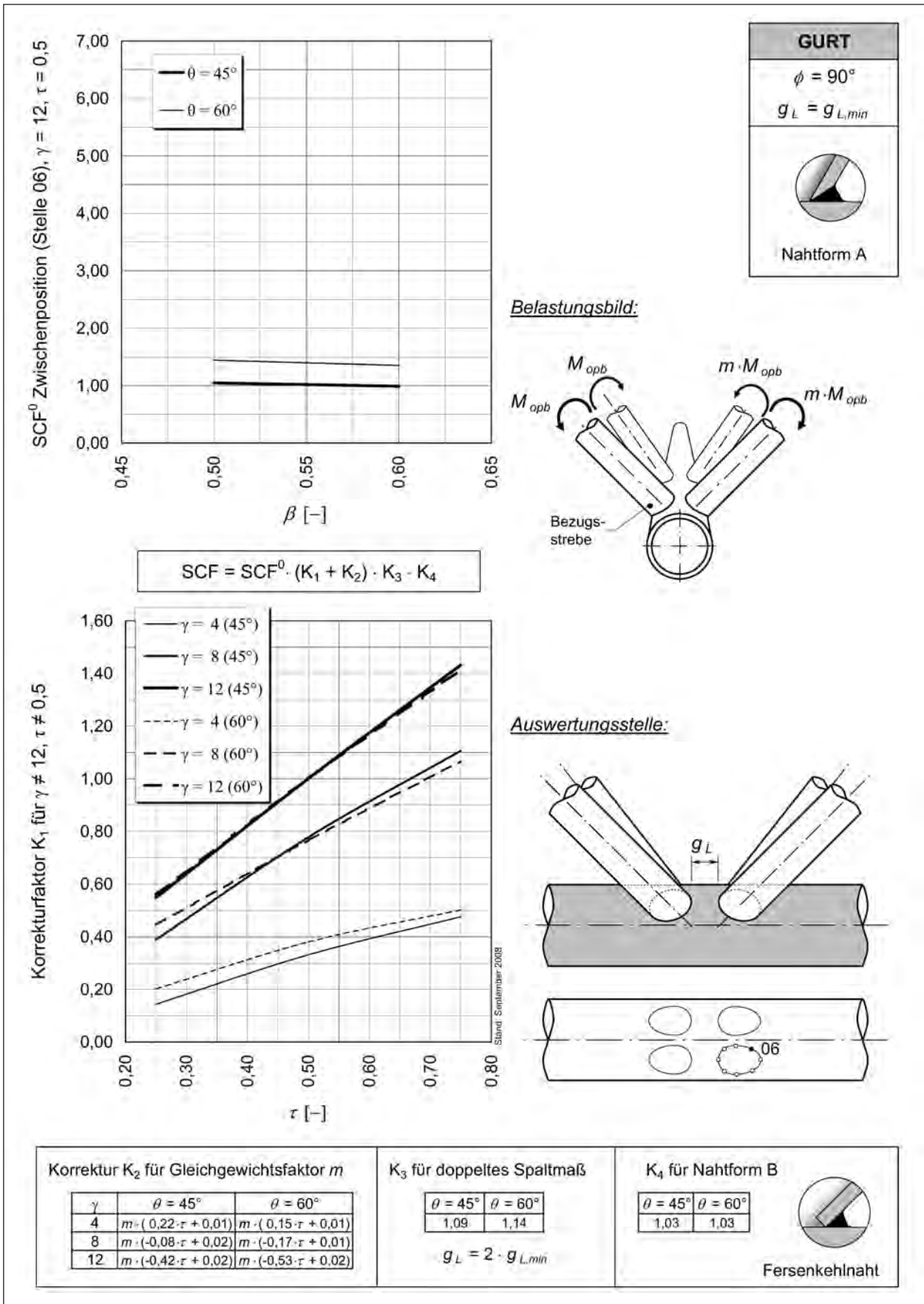


Bild 3-97: SCF<sub>Opb,br</sub> für Lastfall 110, 111, 112 (ausgeglichene Strebenbiegung aus Fachwerkwand), Zwischenposition (04), Gurt



**Bild 3-98:** SCF<sub>opb,br</sub> für Lastfall 110, 111, 112 (ausgeglichene Strebenbiegung aus Fachwerkwand), Zwischenposition (06), Gurt

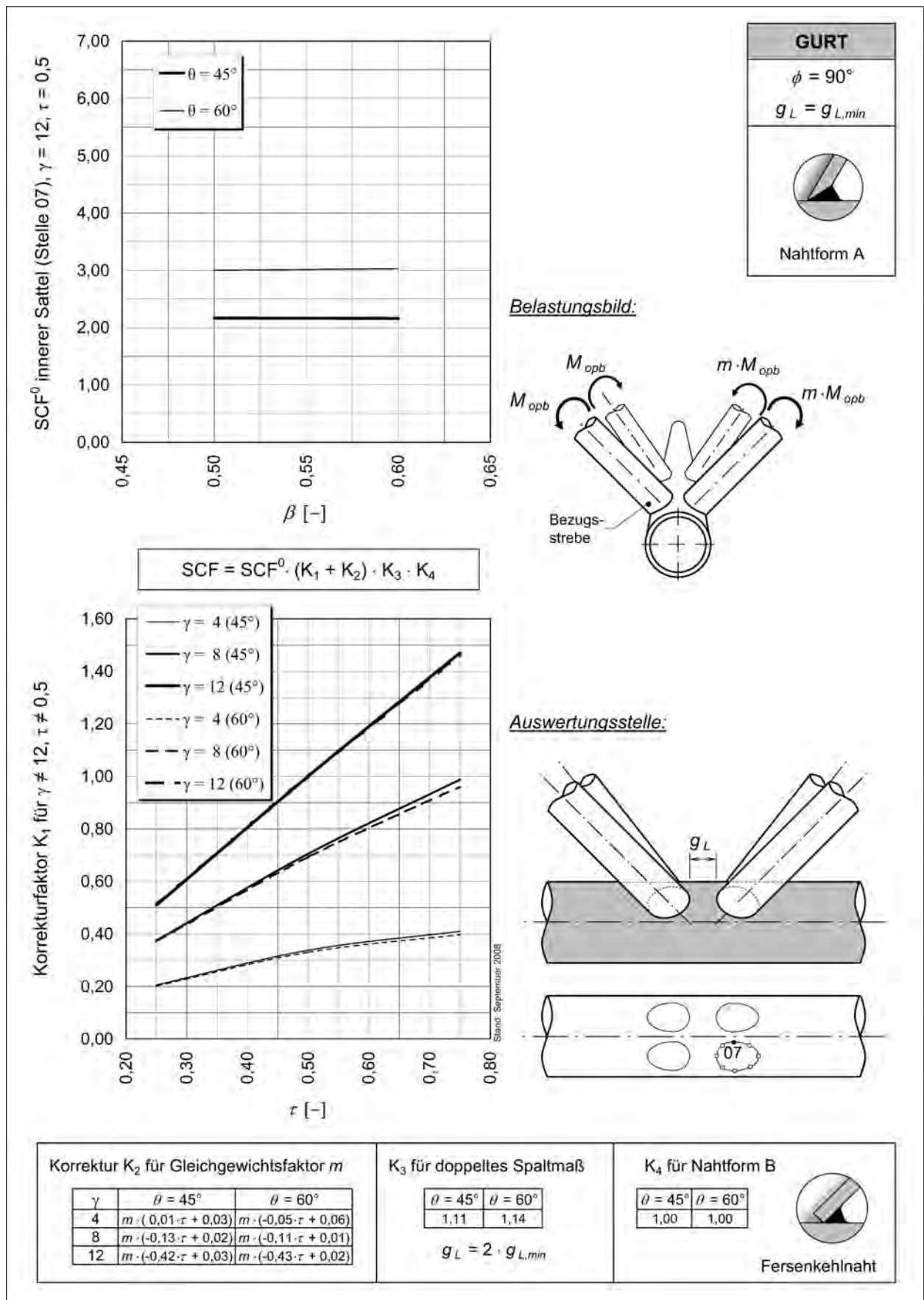


Bild 3-99: SCF<sub>opb,br</sub> für Lastfall 110, 111, 112 (ausgeglichene Strebenbiegung aus Fachwerkwand), innerer Sattel (07), Gurt

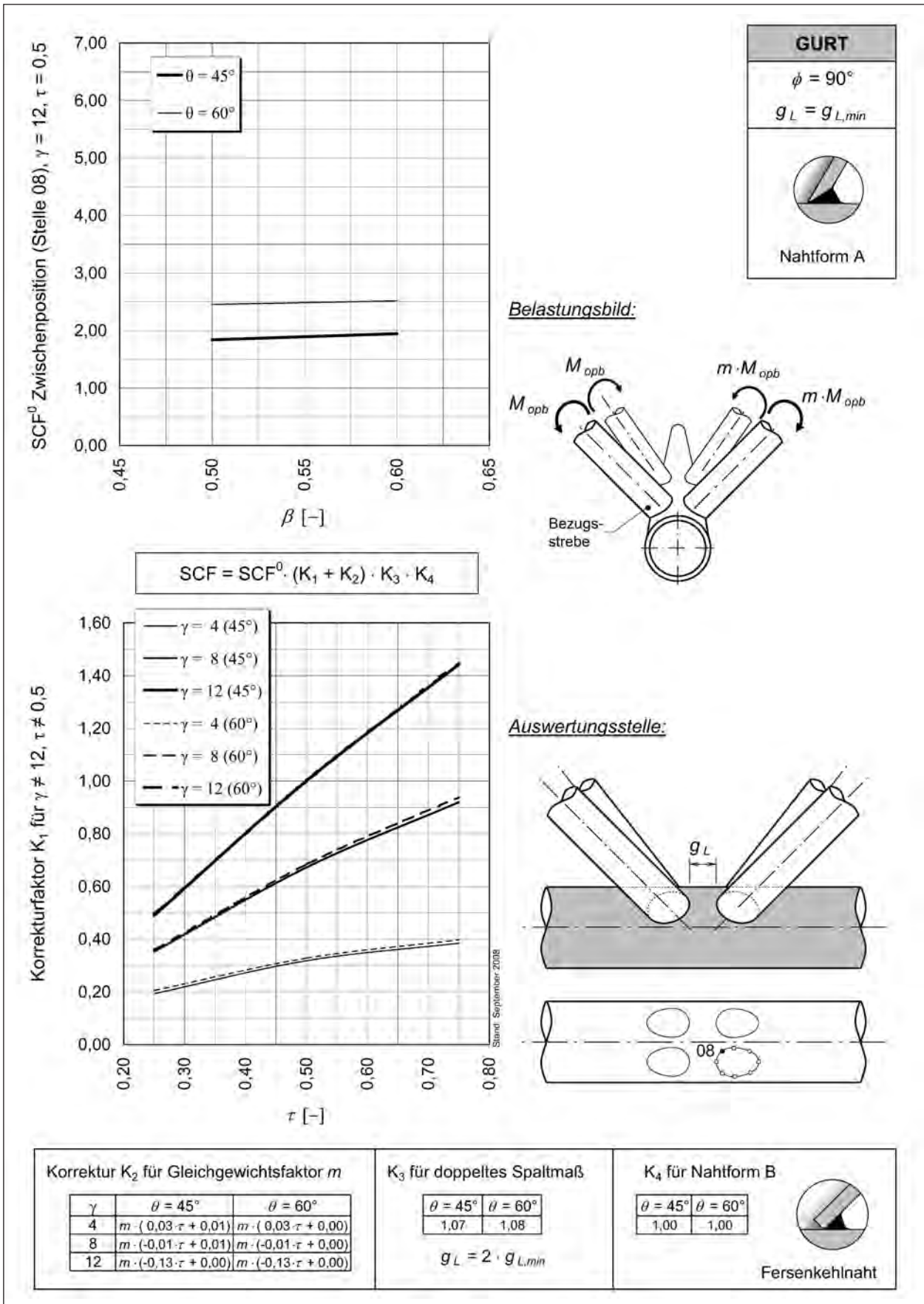


Bild 3-100: SCF<sub>opb,br</sub> für Lastfall 110, 111, 112 (ausgeglichene Strebenbiegung aus Fachwerkwand), Zwischenposition (08), Gurt



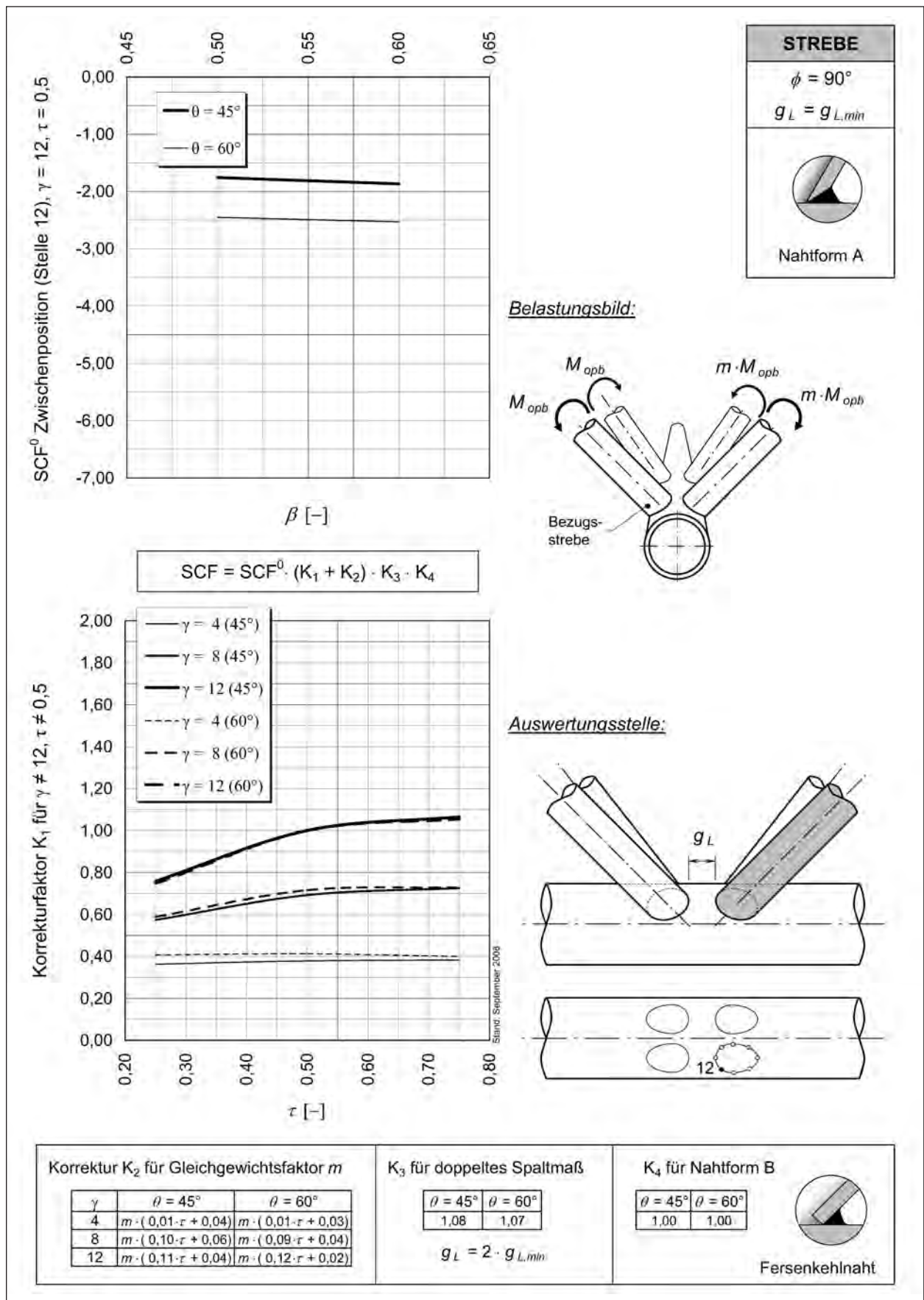


Bild 3-101: SCF<sub>opb,br</sub> für Lastfall 110, 111, 112 (ausgeglichene Strebenbiegung aus Fachwerkwand), Zwischenposition (12), Strebe

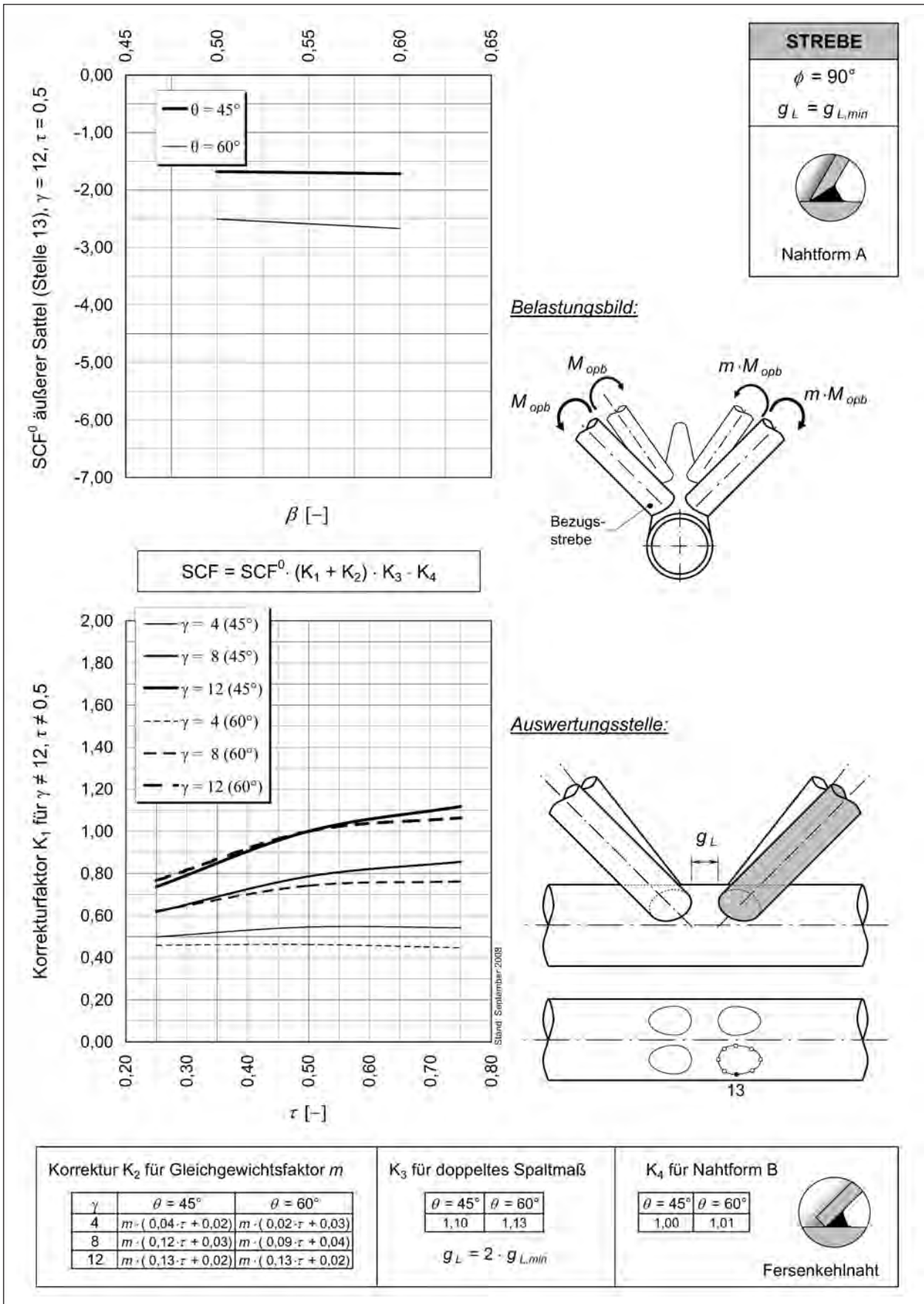


Bild 3-102: SCF<sub>opb,br</sub> für Lastfall 110, 111, 112 (ausgeglichene Strebenbiegung aus Fachwerkwand), äußerer Sattel (13), Strebe

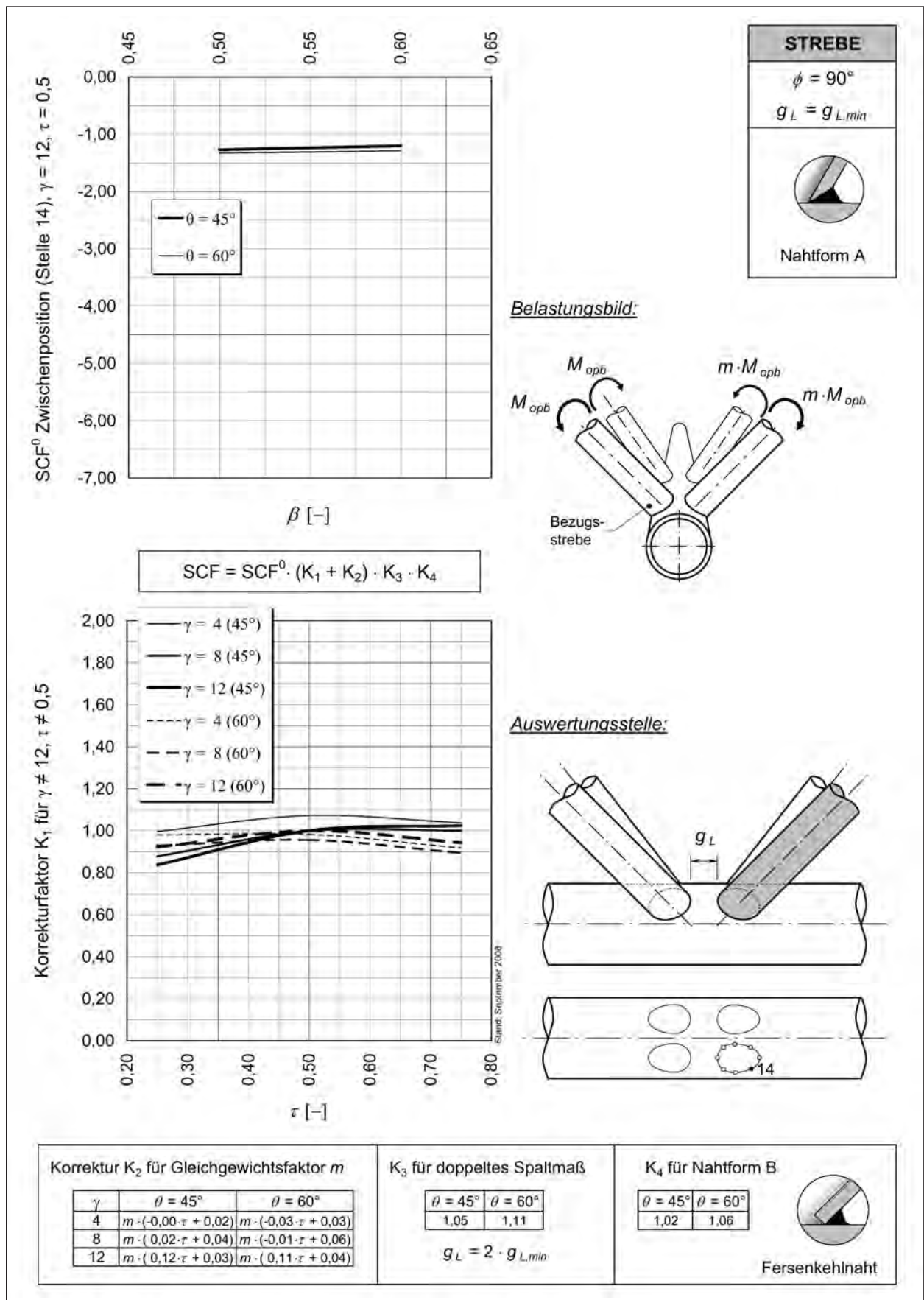


Bild 3-103: SCF<sub>opb,br</sub> für Lastfall 110, 111, 112 (ausgeglichene Strebenbiegung aus Fachwerkwand), Zwischenposition (14), Strebe

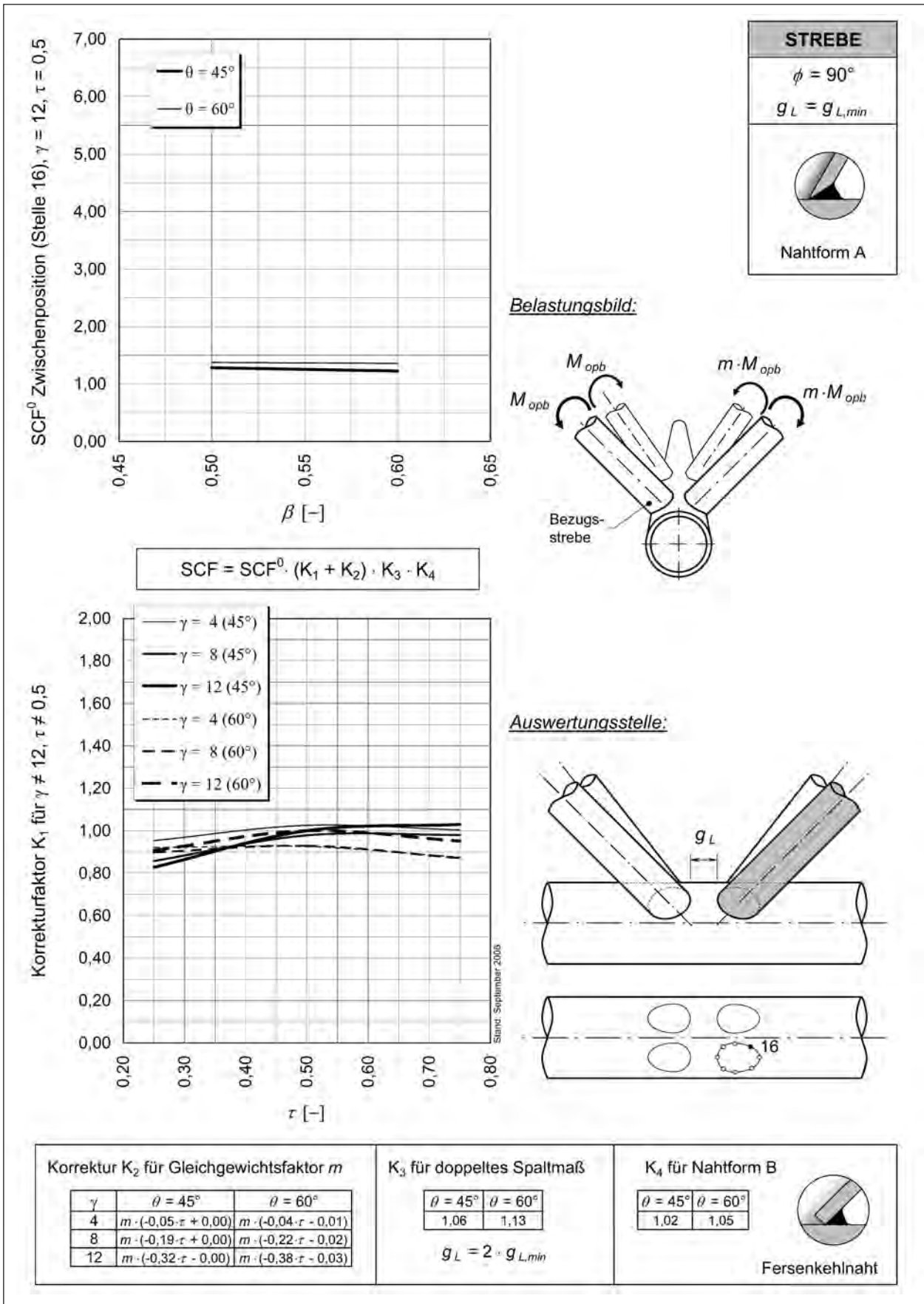


Bild 3-104: SCF<sub>opb,br</sub> für Lastfall 110, 111, 112 (ausgeglichenere Strebenbiegung aus Fachwerkwand), Zwischenposition (16), Strebe

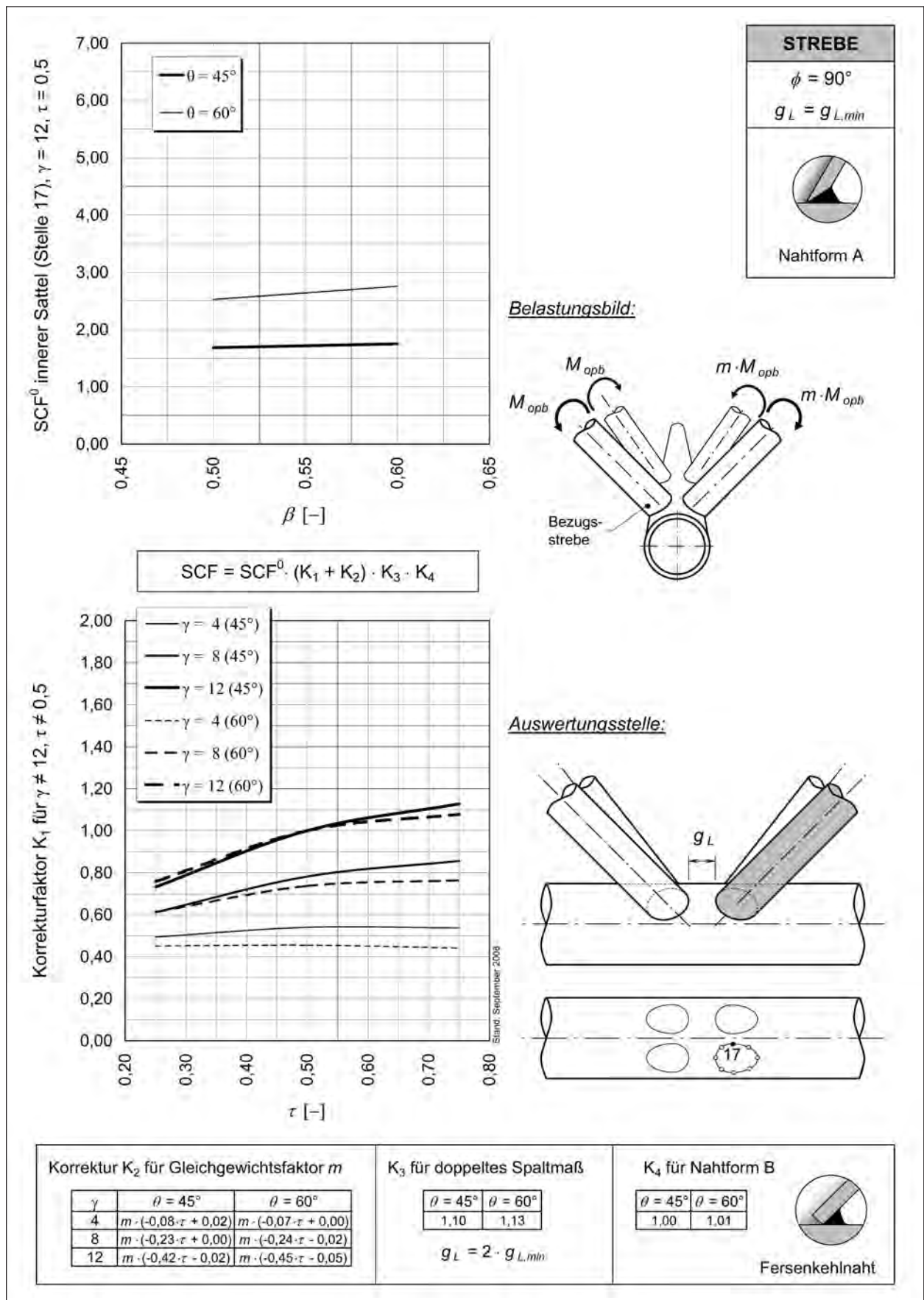


Bild 3-105: SCF<sub>opb,br</sub> für Lastfall 110, 111, 112 (ausgeglichene Strebenbiegung aus Fachwerkwand), innerer Sattel (17), Strebe

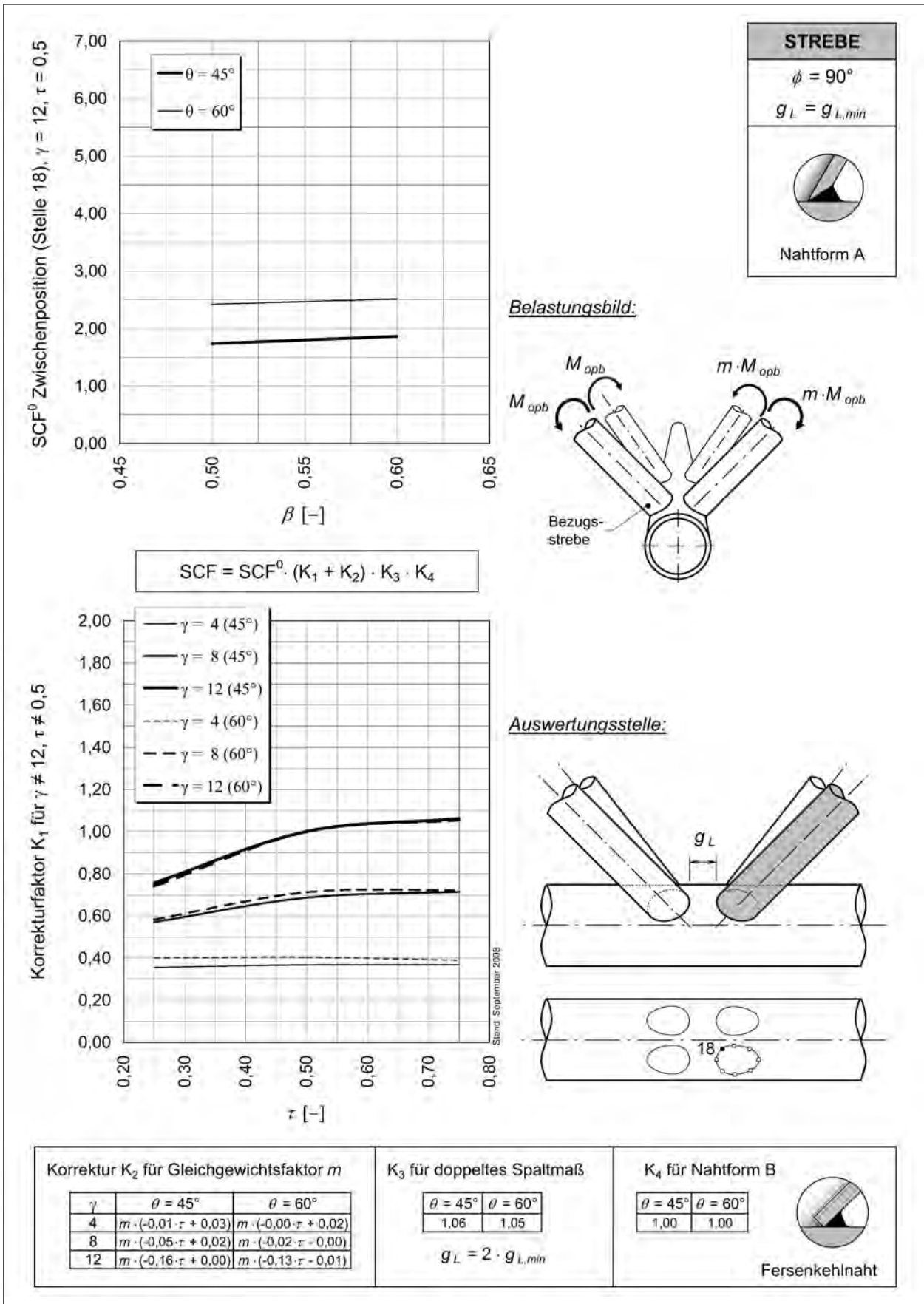


Bild 3-106: SCF<sub>opb,br</sub> für Lastfall 110, 111, 112 (ausgeglichen Strebenbiegung aus Fachwerkwand), Zwischenposition (18), Strebe

## 3.6 Beispiel

### 3.6.1 Vorbemerkung

In diesem Kapitel soll anhand eines Beispiels das grundsätzliche Vorgehen bei der Ermittlung der Strukturspannungen erläutert werden. Um die Schnittgrößenermittlung des Beispiels überschaubar zu gestalten, wird ein dreigurtiger Stahlfachwerkträger mit zwei mittigen Einzellasten untersucht, siehe Bild 3-107. Die Obergurbene, die bei einer Fachwerkverbundbrücke durch die betonierte Fahrbahn gebildet wird, wird in diesem Beispiel der Einfachheit halber durch eine Strebenauskreuzung simuliert.

### 3.6.2 Geometrie

Folgende Angaben liegen vor:

Gurt:  $\varnothing 508 \times 30$

$A_{ch} = 451 \text{ cm}^2$ ,  $W_{ch} = 5.086 \text{ cm}^3$

Streben:  $\varnothing 273 \times 20$

$A_{br} = 159 \text{ cm}^2$ ,  $W_{br} = 938 \text{ cm}^3$

Strebenneigungen:  $\theta = 60^\circ$ ,  $\phi = 90^\circ$

Es wird eine Schweißnahtausführung gemäß Nahtform B gewählt, siehe Bild 2-16 a, c, e. Das erforderliche Mindestspaltmaß soll berechnet werden, siehe Bild 3-107.

### 3.6.3 Belastung

Die beiden Einzellasten in Feldmitte betragen jeweils 100 kN und werden in den Knotenpunkten des Stabwerkmodells eingeleitet.

### 3.6.4 Bestimmung des Parameterbereiches

$$\beta = d_1/d_0 = 273/508 = 0,54$$

$$\tau = t_1/t_0 = 20/30 = 0,67$$

$$\gamma = d_0/(2 \cdot t_0) = 8,5$$

Die Parameter fallen in den untersuchten Bereich des Forschungsvorhabens.

### 3.6.5 Ermittlung des Mindest-Spaltmaßes

Es wird der Bereich ermittelt, in dem das Spaltmaß variieren darf, damit die SCF-Werte dieses Forschungsvorhabens verwendet werden können.

$$L_{max} = 0,20 \cdot d_0 \cdot \sqrt[4]{\frac{\beta \cdot \tau}{\gamma^2}} \quad \text{siehe Formel (2.10)}$$

$$= 0,20 \cdot 508 \cdot \sqrt[4]{\frac{0,54 \cdot 0,67}{8,5^2}}$$

$$= 27 \text{ mm}$$

oder Ablesung in Bild 2-7.

Zur Ermittlung des Mindest-Spaltmaßes wird ferner benötigt:

$$w_{gurt} = 0,50 \cdot t_1 = 10 \text{ mm} \quad (\text{siehe Bild 2-16 (a)})$$

Damit ergibt sich nach Formel (2.11) folgender Mindestwert des Spaltmaßes:

$$g_{L,min} = 2 \cdot L_{max} + 2 \cdot w_{Gurt} = 74 \text{ mm}$$

Es ist noch zu kontrollieren, ob die Schweißbarkeit sichergestellt (vgl. Formel (2.8)) ist:

$$g_{L,min} = 74 \text{ mm} > 2 \cdot t_1 = 40 \text{ mm}$$

Damit darf sich das Spaltmaß in einem Bereich von 74 mm bis 148 mm bewegen. Es wird im Rahmen dieses Beispiels der Mindestwert von 74 mm als Spaltmaß gewählt.

### 3.6.6 Ermittlung der Ausmitte

In der Stabwerksberechnung zum Stahlfachwerkträger ist folgende Ausmitte in Längsrichtung (Bild 3-107) zu berücksichtigen, siehe Formel (2.6 b):

$$e = \tan 60^\circ \cdot \left[ \frac{74}{2} + \frac{273}{2 \cdot \sin 60^\circ} \right] - \frac{508}{2} = 83 \text{ mm}$$

### 3.6.7 Schnittgrößen und deren Zerlegung

Die Schnittgrößen des Stahlfachwerkträgers werden über eine übliche Stabwerksberechnung ermittelt. Dabei werden alle Knotenverbindungen biegesteif ausgebildet, um die sekundäre Biegung zu erfassen. Die Ergebnisse werden in Bild 3-108 wiedergegeben. Die Verteilung der Schnittgrößen auf die Elementarlastfälle sowie die erforderlichen Kompensationskräfte und -momente sind in Bild 3-109 dargestellt.

Folgende Nebenrechnungen sind erforderlich, um die Belastung aus Bild 3-108 in die Elementarlastfälle zu zerlegen:

Lastfall 1:

Die Gurtnormalkräfte werden gemittelt.

$$N_{Mittel} = \frac{787,6 + 653,5}{2} = 720,6 \text{ kN}$$

Lastfall 2:

Die Gurtbiegemomente werden gemittelt.

$$M_{ipb} = \frac{24,4 + 18,9}{2} = 21,7 \text{ kNm}$$

Lastfall 3: nicht vorhanden

Lastfall 4:

Die mittlere Strebenkraft beträgt

$$F = \frac{2 \cdot 66,5 + 2 \cdot 65,8}{4} = 66,2 \text{ kN}$$

Für diesen Lastfall sind zusätzlich kompensierende Schnittgrößen anzusetzen (vgl. Bild 3-3):

$$M_{eq,ipb} = 2 \cdot 66,2 \cdot \cos 60^\circ \cdot 0,083 \cdot \sin (90-45^\circ) = 3,88 \text{ kNm}$$

$$N_{eq} = 2 \cdot 66,2 \cdot \cos 60^\circ = 66,2 \text{ kN}$$

Lastfall 5 und 6: nicht vorhanden

Lastfall 7 und 107:

Die Strebenmomente für Biegung in der Fachwerk-wandebene werden in einen symmetrischen (Mo-mente stehen im Gleichgewicht) und antimetri-schen Anteil zerlegt:

$$\overset{\curvearrowright}{0,51 \text{ kNm}} = \overset{\curvearrowright}{-0,52} + \overset{\curvearrowright}{1,04}$$

$$\overset{\curvearrowright}{1,56 \text{ kNm}} = \overset{\curvearrowright}{0,52} + \overset{\curvearrowright}{1,04}$$

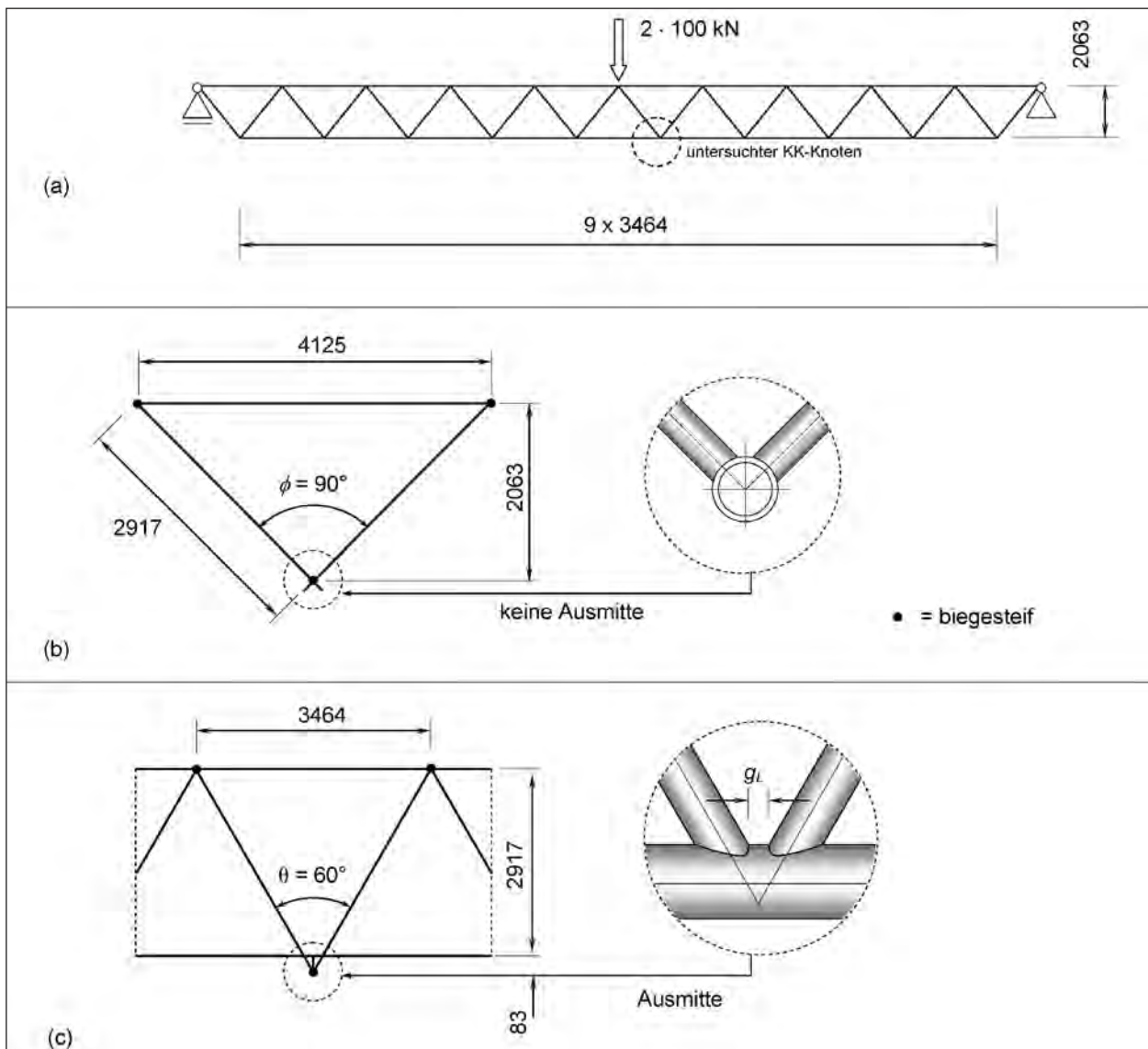


Bild 3-107: Statisches System (Angaben in mm), (a) Längsansicht, (b) Querschnitt, (c) Detail in der Ebene der Fachwerkwand



Für Lastfall 107 sind zusätzlich kompensierende Schnittgrößen anzusetzen (vgl. Bild 3-5):

$$M_{\text{eq,ipb}} = 2 \cdot 1,04 \cdot \cos(90-45^\circ) \\ = 1,47 \text{ kNm}$$

Lastfall 10 und 110:

Die Strebenmomente werden in einen symmetrischen und antisymmetrischen Anteil zerlegt:

$$\begin{array}{rcc} \curvearrowright & \curvearrowright & \curvearrowright \\ 0,24 \text{ kNm} & = & -0,46 + 0,70 \\ \curvearrowright & \curvearrowright & \curvearrowright \\ 1,15 \text{ kNm} & = & 0,46 + 0,70 \end{array}$$

Kontrolle:

Die kompensierenden Schnittgrößen für den Gurt aus Lastfall 4 und 107 müssen zusammen mit der Belastung aus den Lastfällen 1 und 2 die äußere Belastung ergeben:

linker Gurtabschnitt:

$$N = 720,6 + 66,2 = 786,8 \text{ kN} \approx 787,6 \text{ kN}$$

bzw. rechter Gurtabschnitt:

$$N = 720,6 - 66,2 = 654,4 \text{ kN} \approx 653,5 \text{ kN}$$

linker Gurtabschnitt:

$$M_{\text{ipb}} = 21,7 + 3,88 - 1,47 = 24,1 \text{ kNm} \approx 24,4 \text{ kNm}$$

rechter Gurtabschnitt:

$$M_{\text{ipb}} = 21,7 - 3,88 + 1,47 = 19,3 \text{ kNm} \approx 18,9 \text{ kNm}$$

Damit ist nachgewiesen, dass die Schnittgrößenverteilung auf die Elementarlastfälle der äußeren Belastung des Gurts entspricht.

### 3.6.8 Nennspannungen

Bei der Ermittlung der Nennspannung ist vor allem zu beachten, dass die Momente denselben Richtungssinn wie in den Elementarlastfällen aufweisen, vergleiche Bild 3-3 ff. Andernfalls sind die Nennspannungen negativ anzusetzen. Es ergeben sich folgende Nennspannungen:

$$\text{Lastfall 1: } \sigma_{ax,ch} = \frac{N}{A_{ch}} = \frac{720,6}{451} = 1,60 \text{ kN/cm}^2$$

$$\text{Lastfall 2: } \sigma_{ipb,ch} = \frac{M_{ipb,ch}}{W_{ch}} = \frac{-2170}{5086} = -0,43 \text{ kN/cm}^2$$

$$\text{Lastfall 4: } \sigma_{ax,br} = \frac{F}{A_{br}} = \frac{66,2}{159} = 0,42 \text{ kN/cm}^2$$

$$\text{Lastfall 7: } \sigma_{ipb,br} = \frac{M_{ipb,br}}{W_{br}} = \frac{52}{938} = 0,06 \text{ kN/cm}^2$$

$$\text{Lastfall 107: } \sigma_{ipb,br} = \frac{M_{ipb,br}}{W_{br}} = \frac{104}{938} = 0,11 \text{ kN/cm}^2$$

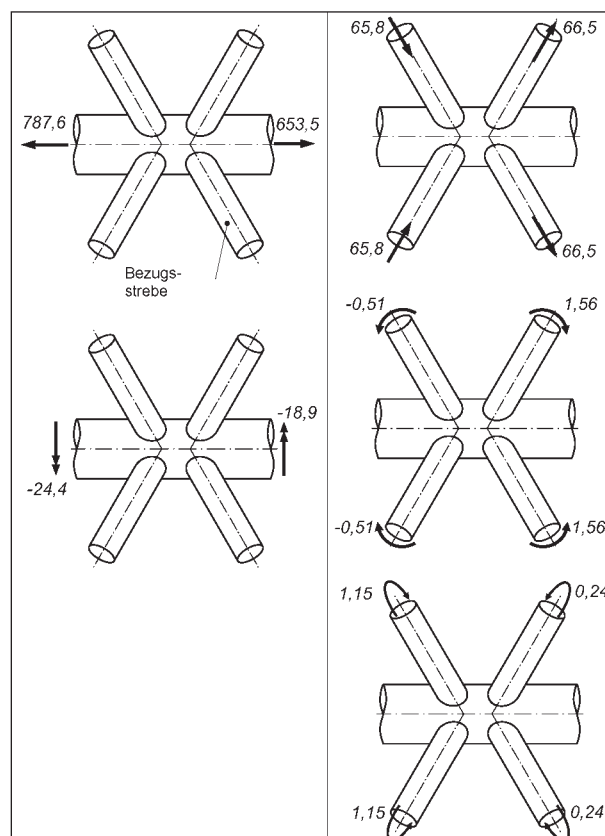
$$\text{Lastfall 10: } \sigma_{opb,br} = \frac{M_{opb,br}}{W_{br}} = \frac{70}{938} = 0,07 \text{ kN/cm}^2$$

$$\text{Lastfall 110: } \sigma_{opb,br} = \frac{M_{opb,br}}{W_{br}} = \frac{-46}{938} = -0,05 \text{ kN/cm}^2$$

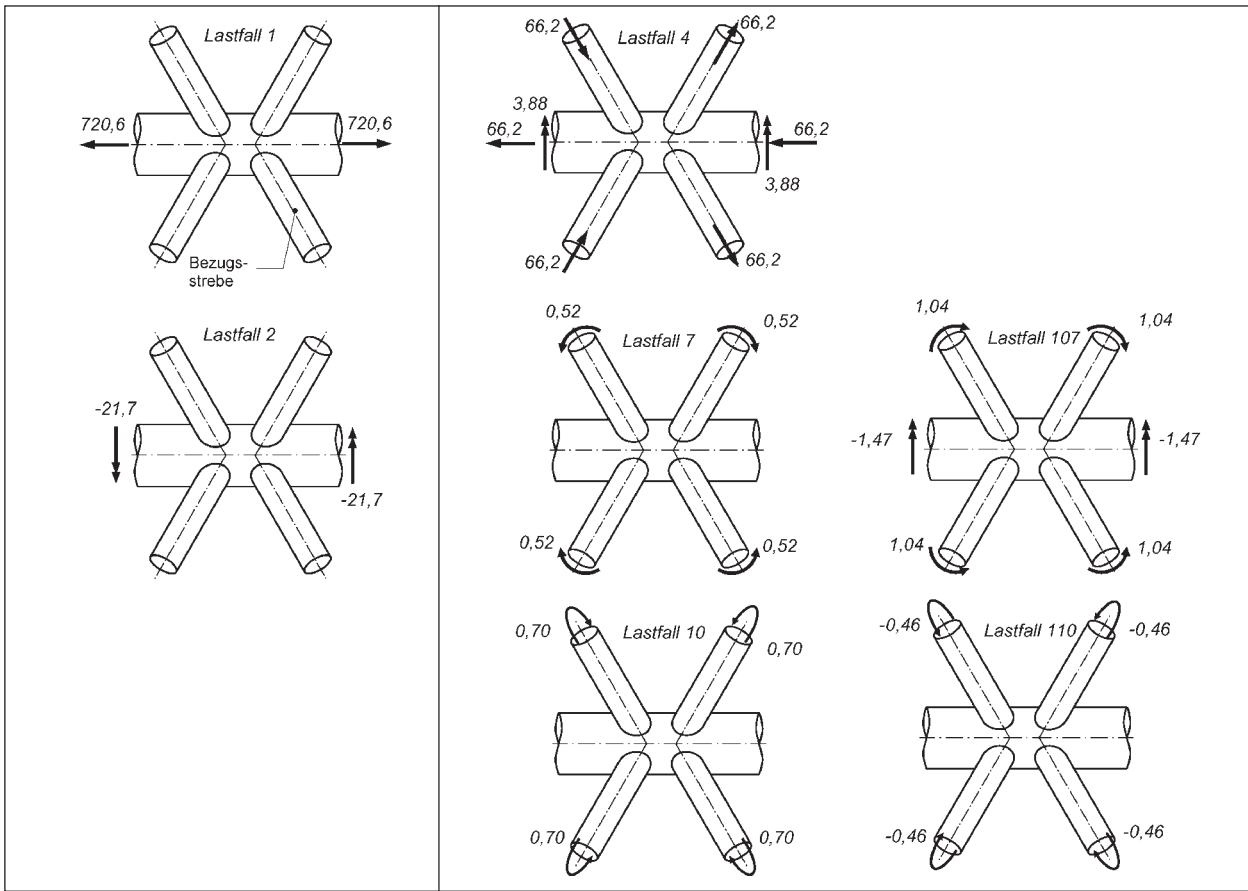
Für alle anderen Lastfälle betragen die Nennspannungen null.

### 3.6.9 Ermittlung der Strukturspannung

Die Strukturspannungen werden exemplarisch für zwei Stellen des Gurts ausgewertet. Als Bezugsstrebe wird in diesem Beispiel eine Zugstrebe gewählt, vgl. Bild 3-108.



**Bild 3-108:** Ergebnisse der Schnittgrößenermittlung (Angaben in kN und kNm)



**Bild 3-109:** Verteilung der Schnittgrößen auf die Elementarlastfälle (Angaben in kN und kNm)

	Lastfall 1		Lastfall 2		Lastfall 4		Lastfall 7		Lastfall 107		Lastfall 110		Lastfall 110		$\sigma_{hs}$
	SCF <sup>0</sup> : K	$\sigma_{nom}$	SCF <sup>0</sup> : K	$\sigma_{nom}$	SCF <sup>0</sup> : K	$\sigma_{nom}$	SCF <sup>0</sup> : K	$\sigma_{nom}$	SCF <sup>0</sup> : K	$\sigma_{nom}$	SCF <sup>0</sup> : K	$\sigma_{nom}$	SCF <sup>0</sup> : K	$\sigma_{nom}$	
01	SCF <sup>0</sup> : 1,18 K <sub>1</sub> = 1,18 K <sub>2</sub> = - K <sub>3</sub> = 1,00 K <sub>4</sub> = 1,00 → K = 1,18 Bild 3-09		SCF <sup>0</sup> : 0,88 K <sub>1</sub> = 1,19 K <sub>2</sub> = - K <sub>3</sub> = 1,00 K <sub>4</sub> = 1,00 → K = 1,19 Bild 3-23		SCF <sup>0</sup> : 2,47 K <sub>1</sub> = 1,08 K <sub>2</sub> = -0,16 K <sub>3</sub> = 1,00 K <sub>4</sub> = 1,00 → K = 0,92 Bild 3-39		SCF <sup>0</sup> : 2,39 K <sub>1</sub> = 0,97 K <sub>2</sub> = -0,29 K <sub>3</sub> = 1,00 K <sub>4</sub> = 1,00 → K = 0,68 Bild 3-55		SCF <sup>0</sup> : 1,92 K <sub>1</sub> = 0,87 K <sub>2</sub> = 0 K <sub>3</sub> = 1,00 K <sub>4</sub> = 1,00 → K = 0,87 Bild 3-69		SCF: 0		SCF: 0		3,02
05	SCF <sup>0</sup> : 1,25 K <sub>1</sub> = 1,16 K <sub>2</sub> = - K <sub>3</sub> = 1,00 K <sub>4</sub> = 1,07 → K = 1,24 Bild 3-12	1,60	SCF <sup>0</sup> : 0,95 K <sub>1</sub> = 1,17 K <sub>2</sub> = - K <sub>3</sub> = 1,00 K <sub>4</sub> = 1,07 → K = 1,25 Bild 3-24	-0,43	SCF <sup>0</sup> : 1,57 K <sub>1</sub> = 0,93 K <sub>2</sub> = -0,77 K <sub>3</sub> = 1,00 K <sub>4</sub> = 1,08 → K = 0,17 Bild 3-43	0,42	SCF <sup>0</sup> : -1,32 K <sub>1</sub> = 0,95 K <sub>2</sub> = -0,23 K <sub>3</sub> = 1,00 K <sub>4</sub> = 1,11 → K = 0,80 Bild 3-59	0,06	SCF <sup>0</sup> : -1,65 K <sub>1</sub> = 1,01 K <sub>2</sub> = -0,28 K <sub>3</sub> = 1,00 K <sub>4</sub> = 1,11 → K = 0,81 Bild 3-72	0,11	SCF: 0	0,07	SCF: 0	-0,05	1,87

Nebenrechnung:

$$\sigma_{hs,i} = \sum_{\text{Lastfälle}} SCF_{i, \text{Lastfall}}^0 \cdot (K_1 + K_2) \cdot K_3 \cdot K_4 \cdot \sigma_{nom, \text{Lastfall}} = \sum_{\text{Lastfälle}} SCF_{i, \text{Lastfall}}^0 \cdot K \cdot \sigma_{nom, \text{Lastfall}}$$

$$\sigma_{hs,01} = 1,18 \cdot 1,18 \cdot 1,60 - 0,88 \cdot 1,19 \cdot 0,43 + 2,47 \cdot 0,92 \cdot 0,42 + 2,39 \cdot 0,68 \cdot 0,06 + 1,92 \cdot 0,87 \cdot 0,11 + 0 \cdot 0,07 - 0 \cdot 0,05 = 2,23 - 0,45 + 0,96 + 0,10 + 0,18 + 0 = 3,02 \text{ kN/cm}^2$$

$$\sigma_{hs,05} = 1,25 \cdot 1,24 \cdot 1,60 - 0,95 \cdot 1,25 \cdot 0,43 + 1,57 \cdot 0,17 \cdot 0,42 - 1,32 \cdot 0,80 \cdot 0,06 - 1,65 \cdot 0,81 \cdot 0,11 + 0 \cdot 0,07 - 0 \cdot 0,05 = 2,48 - 0,51 + 0,11 - 0,06 - 0,15 + 0 = 1,87 \text{ kN/cm}^2$$

Anmerkung: Für alle Lastfälle, für die keine SCF-Werte vertafelt sind, darf der SCF-Wert Null gesetzt werden.

**Tab. 3-2:** Tabellarische Ermittlung der Strukturspannungen (Angaben in kN/cm<sup>2</sup>)

Es werden die Kronenspitze (Stelle 01) und die Kronenferse (Stelle 05) des Gurts betrachtet.

### 3.6.10 Übertragung auf Schwingbreiten

Das im Beispiel dargestellte Vorgehen kann prinzipiell auf Ober- und Unterspannungen übertragen werden und damit zur Ermittlung der Spannungsschwingbreiten herangezogen werden.

## 4 Hinweise zur Ermittlung der Nennspannungen

### 4.1 Einwirkungsseite

Bei der Bestimmung der Strukturspannungen mittels SCF-Werten kommt der richtigen Berechnung der Nennspannung eine große Bedeutung zu. Prinzipiell errechnet sich bei diesem Vorgehen die Strukturspannung zu:

$$\sigma_{hs} = SCF \cdot \sigma_{nom} \quad (4.1)$$

Die Nennspannung  $\sigma_{nom}$  wird hierbei nach den Regeln der technischen Mechanik ermittelt:

$$\sigma_{nom} = \frac{N}{A} \pm \frac{M}{W} \quad (4.2)$$

Sie sollte auf der einen Seite keine spannungserhöhenden Einflüsse, die bereits bei der Ermittlung der SCF-Werte berücksichtigt wurden, enthalten. Auf der anderen Seite sind in der Nennspannung aber all die spannungserhöhenden Effekte wie z. B. aus Sekundärbiegung, die in der Regel bei einer statischen Berechnung vernachlässigt werden, zu erfassen.

### 4.2 Sekundärbiegung

#### 4.2.1 Vorbemerkung

Im Gegensatz zur statischen Auslegung eines Fachwerkknotens aus Hohlprofilen bedarf es bei der Ermüdungsberechnung der Berücksichtigung der so genannten Sekundärbiegung. Die Sekundärbiegung kann durch zwei Ursachen hervorgerufen werden:

#### Ausmittige Stabanschlüsse

Der außermittige Anschluss der Streben an den Gurt bedingt eine zusätzliche Biegung, die in der Regel hauptsächlich vom steiferen Gurt abgetragen wird, vergleiche Bild 4-1.

#### Ausmitte infolge nichtlinearer Spannungsverteilung

Die wahre Spannungsverteilung im Strebenanschluss kann aufgrund von Steifigkeitsunterschieden ungleichförmig sein (vgl. Bild 4-2) und verursacht damit eine zusätzliche Außermittigkeit der einwirkenden Strebenlasten.

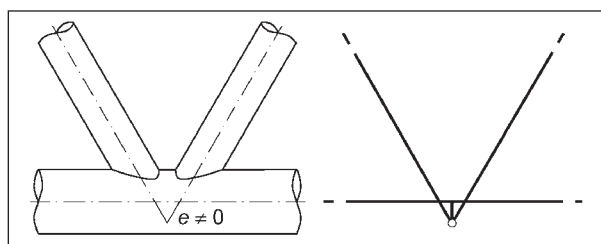


Bild 4-1: Außermittiger Strebenanschluss

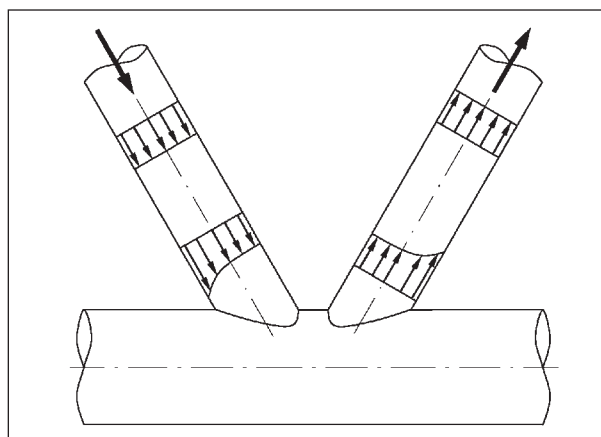


Bild 4-2: Ungleichförmige Spannungsverteilung infolge von Steifigkeitsunterschieden

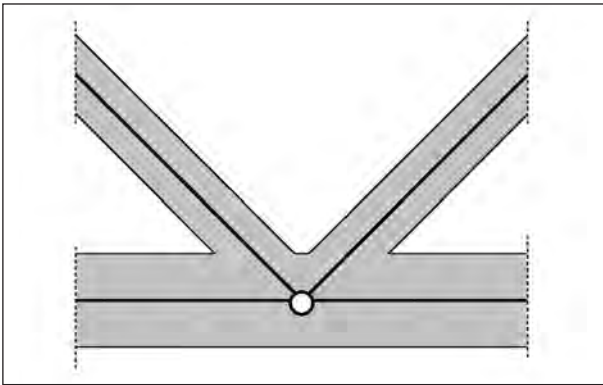
Dadurch wird eine zusätzliche Biegung im Knoten hervorgerufen.

Die Erfassung der beiden Ursachen erfolgt auf unterschiedlichem Wege. Die erste Ursache für Sekundärbiegung ist offensichtlich zwingend bei der Ermittlung der Nennspannungen zu berücksichtigen. Durch die Berücksichtigung entsprechender Ausmitten in der Stabwerksberechnung ergeben sich neben den Stabkräften auch Stabbiegemomente, die am globalen Fachwerksystem ins Gleichgewicht gesetzt werden müssen. Die zweite Ursache der Sekundärbiegung wird über die SCF-Werte berücksichtigt. Den SCF-Werten liegt eine Finite-Elemente-Analyse zugrunde, die die nichtlineare Spannungsverteilung in der Verschneidung von Gurt und Strebe einfängt.

Darüber hinausgehende sekundäre Effekte, die sich aus der lokalen Knotensteifigkeit ergeben, werden unter anderem in [KARAMANOS et al. 1997] diskutiert. Eine erschöpfende Beurteilung dieser Effekte liegt jedoch noch nicht vor.

#### 4.2.2 Sekundärbiegung über Momentenbeiträge

Die traditionelle Ermüdungsberechnung (bis zum Aufkommen der PC-Technik) für ein Fachwerk umfasste eine Stabwerksberechnung, aus der die



**Bild 4-3:** Gelenkig modellierter Fachwerkknoten

Stabschnittgrößen gewonnen wurden. Aus diesen Schnittgrößen wurden nach den Regeln der Festigkeitslehre die Spannungen (Nennspannungen) in den einzelnen Fachwerkstäben ermittelt. Um die Stabwerksberechnung „von Hand“ ausführen zu können, wurde das Stabfachwerk statisch bestimmt, das heißt mit gelenkigen Knotenpunkten, modelliert (siehe Bild 4-3). Die sekundären Biegemomente bzw. die sekundären Biegespannungen wurden über so genannte Momentenbeiwerte berücksichtigt, die die Nennspannungen vervielfachten. Ein solches Vorgehen ist selbstverständlich auch noch heute möglich. Als Hilfsmittel für die Berechnung definiert [DIN EN 1993-1-9] Momentenbeiwerte für einzelne Knotentypen, einschließlich dem K-Knoten.

Es ist wichtig herauszustellen, dass die Momentenbeiwerte (im Sinne der Norm) die Erhöhung der Nennspannungen infolge der nicht berücksichtigten Rahmenwirkung im Fachwerk erfassen. Sie erfassen nicht die lokalen Spannungskonzentrationen. Diese Konzentrationen werden ausschließlich über die SCF abgebildet.

„Bei Fachwerkträgern mit geschweißten Hohlprofilknoten darf von der Annahme gelenkiger Verbindungen an den Anschlüssen ausgegangen werden. Wenn die Spannungen infolge äußerer Lasten auf Bauteile zwischen den Knoten berücksichtigt werden, dürfen die Wirkungen von sekundären Anschlussmomenten aus der Steifigkeit der Verbindungen mit  $k_1$ -Faktoren [...] berücksichtigt werden, siehe Tabelle 4.1 für Kreisquerschnitte“ [DIN EN 1993-1-9].

$k_1$	Gurt	Diagonalen
K-Knoten mit Spalt	1,5	1,3

**Tab. 4-1:** Momentenbeiwerte nach Eurocode 3 [DIN EN 1993-1-9], Tabelle 4.1

[DUTTA 1999], S. 284 empfiehlt für die Gurte und Streben in räumlichen K-Knoten einen Momentenbeiwert von 1,5.

Der Momentenbeiwert steht prinzipiell für folgendes Verhältnis:

$$k = \frac{|\sigma_N| + |\sigma_M|}{|\sigma_N|} \quad (4.3)$$

mit

$\sigma_N$ : Spannung infolge der Stabnormalkraft

$\sigma_M$ : Spannung infolge des Biegemoments

Da die Normalspannung infolge Biegung nicht über den Querschnitt konstant ist, gibt es eigentlich für einen Querschnitt so viele Momentenbeiwerte wie Querschnittspunkte. In vielen Fällen wird der größte Momentenbeiwert nur eine praktische Bedeutung besitzen.

Es stellt sich daher die Frage, ob der Querschnittspunkt mit der größten Biegenormalspannung auch immer der ermüdungskritische Querschnittspunkt ist. Bei einem K-Knoten fällt die ermüdungskritische Kronenspitze des Gurtes mit der Stelle der maximalen Biegenormalspannung zusammen. Für den KK-Knoten trifft dies nicht mehr zu, vergleiche Bild 4-4.

Eine weitere Frage, die nicht durch den vorzeichenlosen k-Wert beantwortet werden kann, ist die nach der Qualität der sekundären Biegespannungen an der ermüdungskritischen Stelle (Druck oder Zug). Anhand des folgenden Zahlenbeispiels soll dies verdeutlicht werden. Das in Bild 4-5 dargestellte einfeldrige dreigurtige Raumfachwerk soll Gegenstand der Betrachtung sein:

Gurte:  $\varnothing 400 \times 50$  ( $A = 550 \text{ cm}^2$ ,  $W = 4.295 \text{ cm}^3$ )

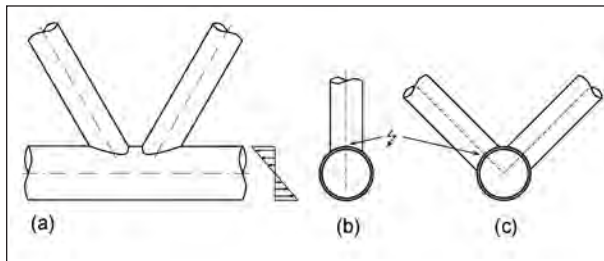
Streben:  $\varnothing 240 \times 37,5$  ( $A = 239 \text{ cm}^2$ ,  $W = 1.054 \text{ cm}^3$ )

$\theta = 60^\circ$ ,  $\phi = 90^\circ$ ,  $\beta = 0,6$ ,  $\gamma = 4$ ,  $\tau = 0,75$

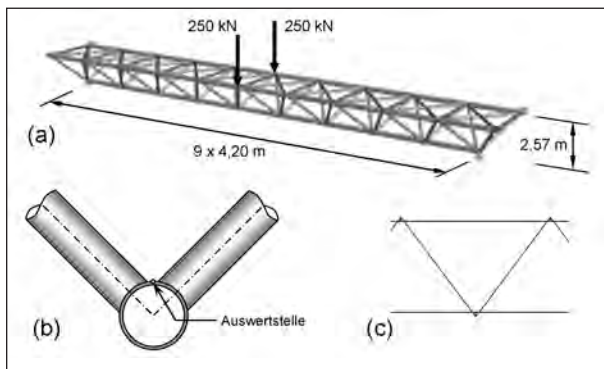
$g_L = 103 \text{ mm}$

Damit ergibt sich nach Gleichung (2.6 b) eine Exzentrizität der Strebe-Gurt-Anschlüsse von 129 mm. Alle Stabanschlüsse wurden biegesteif modelliert. Weitere Angaben zum statischen System können Bild 4-5 entnommen werden. Die Schnittgrößen unter der Einwirkung zweier statischer Lasten von jeweils 250 kN in Feldmitte wurden ermittelt.

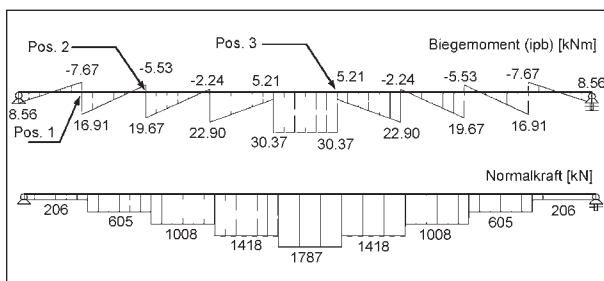
Das Bild 4-6 zeigt die Schnittgrößenverläufe im hochbeanspruchten Untergurt, die sich aus einer



**Bild 4.4:** Bemessungsstellen des Gurts: (a) sekundäre Biege- normalspannungen, (b) ermüdungskritische Kronen- spitze beim K-Knoten und (c) beim KK-Knoten



**Bild 4-5:** Berechnungsbeispiel: (a) statisches System, (b) Quer- schnitt, (c) Modellierung der außermittigen Stab- anschlüsse



**Bild 4-6:** Schnittgrößenverlauf im Untergurt

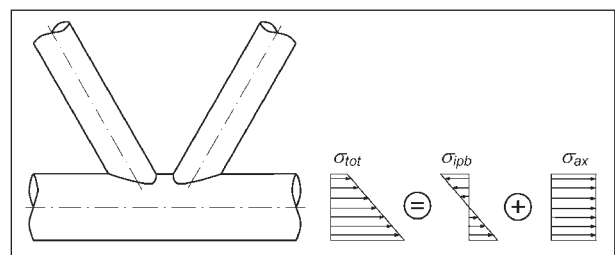
Stabwerksberechnung (Balkenelemente, Theorie I. Ordnung) ergeben. Aus den Schnittgrößen wurden für drei Tragwerksstellen (Pos. 1 bis 3) die Spannungen ermittelt. Anschließend wurden die Normalspannungen infolge kombinierter Momenten-Normalkraftbeanspruchung und die Normalspannungen infolge alleiniger Normalkraft ins Verhältnis gesetzt. Die Ergebnisse sind in Tabelle 4-2 abgedruckt.

Der Anschaulichkeit halber werden in diesem Beispiel die Spannungen für den oberen Scheitelpunkt des Untergurts (siehe Bild 4-5) ausgewertet. Dieser Punkt wäre nur im Falle eines K-Knotens ein so genannter ermüdungskritischer Hot-Spot.

Die Ergebnisse lassen folgende Aussagen zu:

	Pos. 1	Pos 2	Pos. 3
N [kN]	206	605	1.787
$\sigma_{ax}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	+3,7	+11	+32
$M_{ipb}$ [kNm]	-7,7	-19,7	30,4
$\sigma_{ipb}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	+1,8	+4,6	-7,1
$\sigma_{tot} = \sigma_{ipb} + \sigma_{ax}$	+5,5	+15,6	+24,2
$\sigma_{tot}/\sigma_{tot,Stelle 3}$	23 %	64 %	100 %
$k = \sigma_{tot}/\sigma_{ax}$	1,43	1,42	0,76

**Tab. 4-2:** Vergleich der Spannungen im Scheitel des Obergurts (Auswertstellen)



**Bild 4-7:** Spannungsüberlagerung

- Die größten Normalspannungen treten erwartungsgemäß in Feldmitte auf. Damit ist ein Nachweis an dieser Tragwerksstelle zu führen.
- Es fällt auf, dass bei Betrachtung des gesamten Trägers Momentenbeiwerte  $k$  von größer 1,4 für den Untergurt auftreten. Allerdings treten die hohen Momentenbeiwerte  $k$  nur für Tragwerksbereiche mit geringer Auslastung  $\sigma_{tot}$  auf.
- An der maßgebenden Stelle unter den Einzel- lasten in Feldmitte treten Momentenbeiwerte kleiner 1 auf. An dieser Stelle wird die Durch- laufwirkung des Untergurts aktiviert, die zu Druckspannungen im Bereich des Untergurt- scheitels führt, vergleiche Bild 4-7.
- Für die ermüdungskritischen Querschnitts- punkte beim KK-Knoten (vgl. Bild 4-4) fallen die  $k$ - Werte geringer aus als im Untergurtscheitel.

In Erweiterung des vorgestellten Beispiels wurde eine Studie an einem dreifeldrigen Durchlaufsystem mit Wanderlast durchgeführt.

- Feldlängen 37,8/46,2/37,8 m,
- Gurte:  $\varnothing$  400 x 50,
- Streben:  $\varnothing$  240 x 37,5,
- H = 2,60 m,
- Strebenneigung im Querschnitt  $\phi = 90^\circ$ ,

- Strebenneigung in Gurtlängsrichtung  $45^\circ/60^\circ$ .

Als Ergebniss der Untersuchungen kann zusammenfassend festgestellt werden, dass auch unter einer Wanderlast für das untersuchte System alle Momentenbeiwerte für die ermüdungskritischen Stellen des Untergurts (sowohl für den K- als auch für den KK-Knoten) in Feldmitte sowohl im Rand als auch im Innenfeld unter 1,0 liegen. Für die Streben ergeben sich mit zunehmendem  $\beta$ -Wert teilweise größere Momentenbeiwerte als 1,5.

Die hier vorgestellten numerischen Untersuchungen werden durch die Messungen von [SCHUMACHER 2003] an K-Knoten bestätigt. In ihrer Versuchsreihe ermittelte [SCHUMACHER 2003] kleinere Momentenbeiwerte als 1,0 für den Gurt. Die von ihr gemessenen Momentenbeiwerte für die Streben betragen 1,5 bis 1,8 und damit wesentlich mehr als die in [DIN EN 1993-1-9] empfohlenen 1,3. Im Sinne einer wirtschaftlichen und zuverlässigen Bemessung wird daher eine genaue Erfassung der Sekundärbiegung empfohlen, vgl. Kapitel 4.2.3.

#### 4.2.3 Explizite Erfassung der Sekundärbiegung

Seit Beginn der computergestützten Stabwerksberechnung in den 1980er Jahren ist es nunmehr möglich, innerlich hochgradig statisch unbestimmte Fachwerke, das heißt Fachwerke mit biegesteifen Knotenpunkten, mit geringem Zeiteinsatz zu berechnen. Die Sekundärbiegung infolge biegesteifer Knotenverbindungen wird hierbei von der Berechnung automatisch berücksichtigt. Die Erfassung der Sekundärbiegung über Momentenbeiwerte ist bei einer solchen Modellierung nicht mehr erforderlich.

### 4.3 Zusammenfassung

In diesem Kapitel wurden wichtige Hinweise zur Ermittlung der Nennspannungen zusammengetragen. An einem Beispiel wurde explizit die beschränkte Aussagekraft der Momentenbeiwerte in [DIN EN 1993-1-9] verdeutlicht. Mit Blick auf das vorgestellte Beispiel und die Tatsache, dass die statische Untersuchung einer Fachwerkbrücke ohnehin eine computergestützte Stabwerksberechnung erfordert, erscheint es daher hinsichtlich der Gurtdimensionierung ein Gebot der Wirtschaftlichkeit und hinsichtlich der Strebendimensionierung ein Gebot der Sicherheit, die sekundäre Biegung durch eine Stabwerksberechnung direkt zu erfassen. Diese Emp-

fehlung steht nicht im Gegensatz zu [DIN EN 1993-1-9]. Es gilt jedoch zu beachten, dass die Erfassung der sekundären Biegung durch die Modellierung von biegesteifen Gurt-Streben-Verbindungen für den Gurt zu einer Verringerung der Beanspruchung führt. Diese ist jedoch nur dann gewährleistet, wenn der Hohlprofilknoten tatsächlich einen biegesteifen Fachwerkknoten darstellt, was wegen der fehlenden Knotenbleche (Gestaltsfestigkeit) nicht immer zu 100 % gegeben sein muss. Wenn keine weiterführenden Untersuchungen zur Knotensteifigkeit vorgenommen werden, wird daher empfohlen, auf die Berücksichtigung günstig wirkender Biegespannungsanteile zu verzichten.

## 5 Hintergründe zur numerischen Ermittlung der SCF-Werte

### 5.1 Vorbemerkung

In diesem Kapitel werden die theoretischen Hintergründe näher beleuchtet, die zum Verständnis der Ermittlung der SCF-Werte notwendig sind. Die SCF-Werte dieses Forschungsvorhabens wurden aus den Strukturspannungen durch Bezug auf die einwirkende Nennspannung abgeleitet. Zur Ermittlung der Strukturspannungen wurde ein parametrisiertes, räumliches Finite-Element-Modell eines KK-Knotens erstellt. Die Software ANSYS 10.0 [ANSYS] wurde zur Generierung genutzt. Die Untersuchungen folgten weitestgehend dem Vorgehen von [SCHUMACHER 2003] und [ROMEIJN 1994].

### 5.2 Modellierung

Wegen der unsymmetrischen Beanspruchung konnte die Doppelsymmetrie des KK-Knotens nicht genutzt werden. Der Knoten musste daher komplett generiert werden. Entsprechend den Empfehlungen in [ROMEIJN 1994] wurde die Gurtlänge des FE-Modells mit  $5 \cdot d_0$  angesetzt. Die Strebenlänge betrug rund  $3 \cdot d_0$ , siehe Bild 5-1. Diese Wahl der Gurt- und Strebenlänge ist von folgenden Überlegungen geleitet. Zu große Gurtlängen führen im FE-Modell zu sekundären Biegebeanspruchungen, die keine Entsprechung in der Realität besitzen. Andererseits sind die Längen der Streben und des Gurts nicht zu kurz auszubilden, damit Singularitätseffekte, die aus der Lagerung resultieren, nicht in den Knotenbereich hineinreichen.

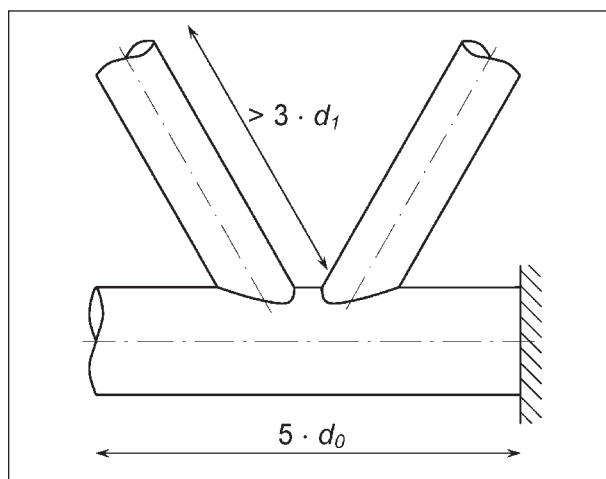


Bild 5-1: FE-Modell mit Lagerung (nicht maßstäblich)

Die Lagerung des modellierten KK-Knotens muss den in der Realität vorherrschenden Lagerungsverhältnissen entsprechen oder diese annähern. Untersuchungen zu verschiedenen Lagerungen erfolgten durch [ROMEIJN 1994] und [SCHUMACHER 2003]. Dabei wurde festgestellt, dass die einseitige Einspannung des Gurts zusammen mit kompensierenden Gurtnormalkräften und/oder Gurtbiegung (siehe Kapitel 3.4.5) am zutreffendsten ist. Diese Lagerung wurde daher gewählt, vergleiche Bild 5-1.

### 5.2.1 Verschneidungskurven

Die genaue Modellierung der Verschneidungskurven von Gurt und Strebe, des Verlaufs der Schweißnahtübergänge sowie der um die Verschneidung verlaufenden Pfade, an denen die Spannungen ausgewertet werden, besitzt größte Bedeutung für die Zuverlässigkeit der FE-Ergebnisse.

In Bild 5-2 wird am Beispiel einer Streben-Gurt-Verschneidung exemplarisch gezeigt, wie die einzelnen Punktkoordinaten der Verschneidungskurve ermittelt werden. Es wird die Verschneidung zwischen den Außenoberflächen betrachtet. Alle Koordinaten werden in Abhängigkeit des umlaufenden Winkels  $\delta$  ( $0^\circ$  bis  $360^\circ$ ) definiert. In einem ersten Schritt werden die Koordinaten  $\bar{x}$  und  $z$  des Strebenschnittes durch die in eine Ebene aufgerollt gedachte Gurtoberfläche ermittelt. Die Verschneidungskurve hat die Form einer Ellipse. Die elliptische Verschneidungskurve ist in der bisherigen Betrachtung eben. In einem zweiten Schritt muss daher die  $y$ -Koordinate so eingeführt werden, dass die räumliche Krümmung der Verschneidungskur-

ve im Querschnitt erfasst wird. In einem letzten Schritt ist die  $x$ -Koordinate der Verschneidungskurve in Abhängigkeit der bereits ermittelten  $y$ - und  $z$ -Koordinate zu bestimmen.

Das Vorgehen für die Verschneidung der Innenoberflächen bzw. der Innen- mit den Außenoberflächen der Strebe und des Gurts erfolgt analog.

Mit den so aufgefundenen Koordinaten können die Verschneidungskurven als so genannte Splines im FE-Modell generiert werden. Um einen möglichst fließenden Verlauf der räumlichen Verschneidungskurven sicherzustellen, wird der Kurvenumfang alle  $2^\circ$  mit einem Punkt versehen.

### 5.2.2 Extrapolationspfade

Für die Ermittlung der Strukturspannungen ist eine Extrapolation der Spannungen erforderlich. Die durch ein FE-Programm ermittelten Spannungen am Schweißnahtübergang entsprechen nicht den Strukturspannungen, sondern den Kerbspannungen  $\sigma_k$ , vorausgesetzt die Kerbwirkung der Schweißnaht wurde realistisch z. B. durch Ausrundung mittels Kerbradien erfasst.

Die Strukturspannungen werden ausgehend von einem ausreichend weit vom Schweißnahtübergang entfernten Bauteilbereich durch Extrapolation des Spannungsverlaufes in den Bereich des Schweißnahtübergangs ermittelt, siehe Bild 5-4. Ausgangspunkt der Extrapolation bilden in der Regel zwei Stützstellen, die über ihre Entfernung  $L_{\min}$  und  $L_{\max}$  zum Schweißnahtübergang definiert werden. Die Stützstellen der Extrapolation werden im folgenden Extrapolationspunkte genannt.

Die Entfernung der Extrapolationspunkte vom Schweißnahtübergang hat entscheidenden Einfluss auf die Qualität, mit der die Strukturspannungen abgeschätzt werden, und bedarf daher einer normativen Festlegung. In der Literatur existiert eine Vielzahl von Definitionen, vergleiche [HAIBACH 1989]. Für die Hohlprofilknoten aus Rundhohlprofilen werden in der Regel die Grenzen in Tabelle 5-1 verwendet, die auch den numerischen Untersuchungen in [ROMEIJN 1994] und [SCHUMACHER 2003] zugrunde gelegt und ebenfalls in diesem Forschungsprojekt genutzt wurden.

Die Extrapolation kann in Abhängigkeit von der Qualität der Spannungsgradienten linear (wie in Bild 5-4) oder quadratisch durchgeführt werden.

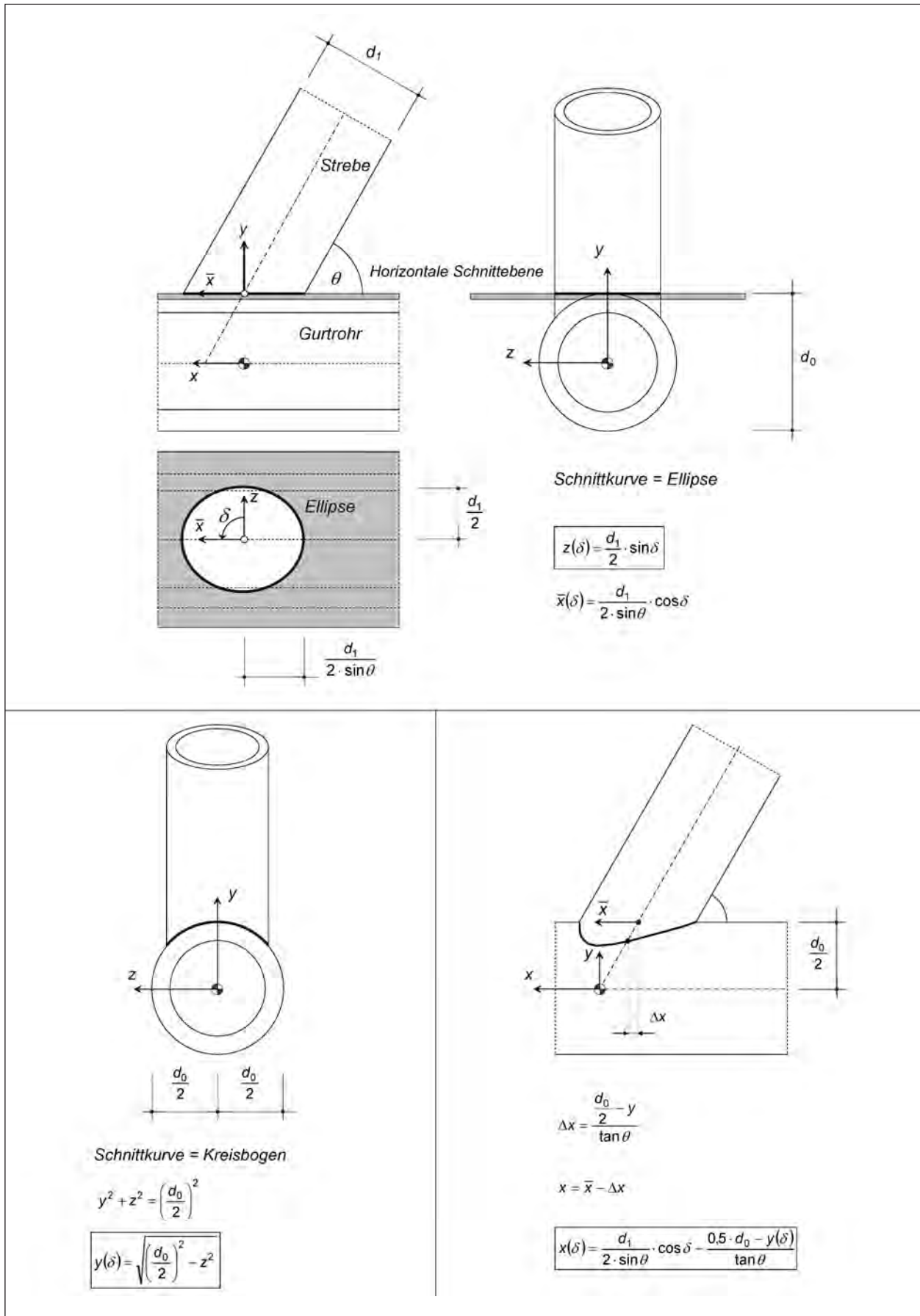


Bild 5-2: Koordinaten der Verschneidungskurve



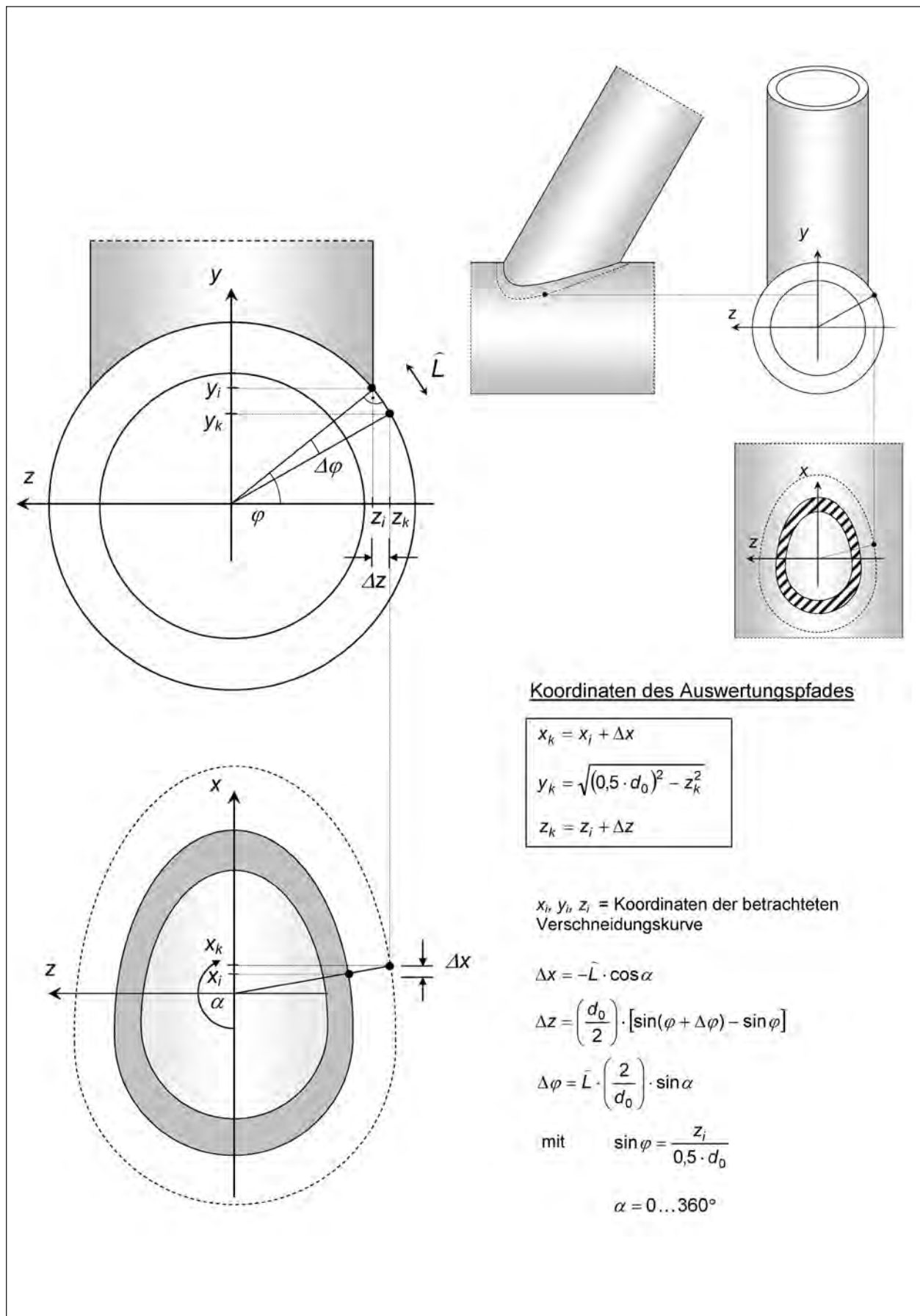
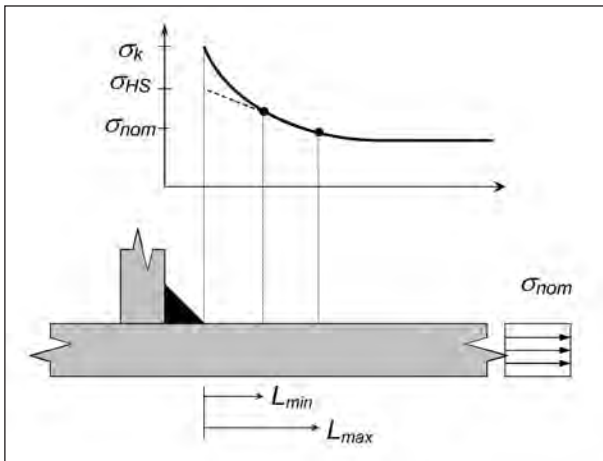


Bild 5-3: Koordinaten der Extrapolationspfade



**Bild 5-4:** Ermittlung der Strukturspannungen, Extrapolationspunkte

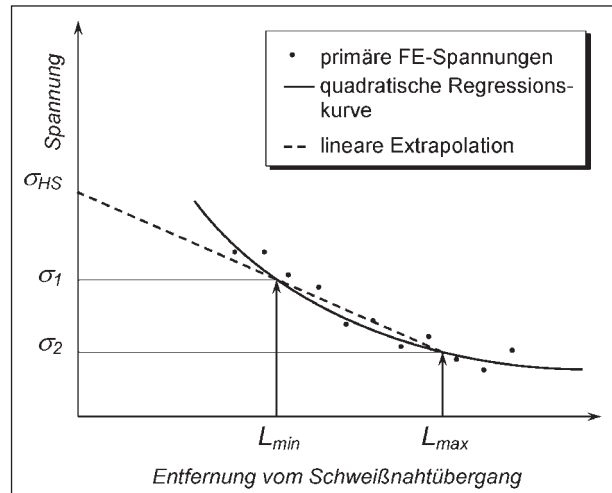
Abstand vom Schweißnahtübergang	Gurt		Strebe Sattel und Krone
	Sattel	Krone	
$L_{min}^*)$	$0,4 \cdot t_0$		$0,4 \cdot t_1$
$L_{max}^{**})$	$0,09 \cdot r_0$	$0,4 \cdot \sqrt[4]{r_0 t_0 r_1 t_1}$	$0,65 \cdot \sqrt[3]{r_1 t_1}$
*) $L_{min} \geq 4 \text{ mm}$			
**) $L_{max} \geq L_{min} + 0,6 \cdot t_1$			

**Tab. 5-1:** Grenzen für den Extrapolationsbereich nach CIDECT Design Guide Nr. 8 [ZHAO et al. 2002]

Allerdings hat sich die rein quadratische Extrapolation für Rundhohlprofile als ungeeignet erwiesen, da sie zur Überschätzung der einwirkenden Strukturspannung neigt. Auf der anderen Seite kann eine lineare Extrapolation bei einem starken Spannungsanstieg (hohe Kerbschärfe) zu einer Unterschätzung führen. Daher verwendet man eine Kombination aus linearer und quadratischer Extrapolation [ROMEIJN 1994]. Hierbei wird in einem ersten Schritt eine quadratische Regressionskurve für die Spannungen innerhalb und in der Umgebung des Extrapolationsbereiches ermittelt. Anschließend werden die Spannungswerte der Regressionskurve an den Extrapolationspunkten ermittelt, mit denen letztendlich eine lineare Extrapolation an den Schweißnahtübergang vorgenommen wird.

$$\sigma_{HS} = \sigma_1 - \frac{\sigma_1 - \sigma_2}{L_{max} - L_{min}} \cdot L_{min} \quad (5.1)$$

Da die Spannungen um den ganzen Umfang der Gurt-Streben-Verschneidung ausgewertet werden müssen, bilden die Extrapolationspunkte umlaufende Pfade auf dem Gurt und den Streben. Die Koordinaten dieser Pfade werden analog konzentrischer Kreise durch eine Streckung aus der betrachteten Verschneidungskurve gewonnen, Bild 5-3.



**Bild 5-5:** Verwendete Extrapolation der Spannungen

Die Entfernung des Auswertungspfades  $\hat{L}$  von der betrachteten Verschneidungskurve ist bekannt und wird als Bogenlänge auf der Außenoberfläche gemessen.

### 5.2.3 Schweißnahtmodellierung

Von [ROMEIJN 1994] wurde die Frage nach der Notwendigkeit einer Schweißnahtmodellierung bei Rohrknöten im Hoch- und Kranbau wie folgt beantwortet:

- Die Modellierung der Schweißnaht erhöht grundsätzlich die Genauigkeit der Berechnung.
- Eine Vernachlässigung der Schweißnaht führt zu konservativen Ergebnissen für den Gurt und zu einer Unterschätzung der Spannungen in der Strebe.

Im Sinne einer zuverlässigen und zugleich wirtschaftlichen Bemessung wurde daher im Rahmen dieses Forschungsprojekts das in Bild 2-15 und Bild 2-16 dargestellte Schweißnahtprofil implementiert. Die Modellierung des Schweißnahtübergangs erfolgte analog dem Vorgehen in Kapitel 5.2.2.

### 5.2.4 Elementtyp

Die Modellierung des KK-Knotens erfolgte mit Volumenelementen in Hexaederform (Elementtyp SOLID 95 nach [ANSYS]), vgl. Bild 5-7 und Bild 5-8. Hierbei handelt es sich um ein 20 Knoten umfassendes Element, das über eine isoparametrische Formulierung mit quadratischen Ansatzfunktionen verfügt. Dieses Element ist in der Lage, Biegebeanspruchungen in der Gurt- und Strebenwandung bei geringer Elementanzahl abzubilden. Des

Weiteren ist es besonders gut geeignet, geschwungene Geometrien ohne einen großen Verlust an Genauigkeit darzustellen. Hinsichtlich des gewählten reduzierten Integrationschemas  $2 \times 2 \times 2$  wird auf die Untersuchungen in [ROMEIJN 1994] verwiesen.

### 5.2.5 Diskretisierung

Die Vernetzung wurde auf der Basis von Hexaeder-Volumenelementen restriktiv gesteuert (mapped meshing). Über die dickere Gurtwand wurden drei, über die dünnere Strebenwand zwei Elemente vorgesehen. Der Bereich der Verschneidungskurven wurde durch 80 Elemente unterteilt. Die Schweißnaht wurde durch mindestens zwei Elementreihen gebildet.

## 5.3 Materialverhalten

Es wurde linear-elastisches Materialverhalten des Stahls unterstellt. Der Elastizitätsmodul wurde zu  $E = 210.000 \text{ N/mm}^2$  angesetzt, die Querdehnungszahl zu  $\mu = 0,30$ .

## 5.4 Belastung

Die Lasteinleitung in die Streben und in den Gurt erfolgte durch kurze Stabelemente (BEAM4 nach [ANSYS]), die mit allen Solid-Elementen des Streben- bzw. Gurtumfangs an den jeweiligen Stabenden starr gekoppelt wurden. Die Lasten konnten daher in Form von Einzelkräften und Einzelmomenten aufgebracht werden.

## 5.5 Spannungsermittlung

Nach der Philosophie des Eurocode 3 sind nur die Spannungen ermüdungswirksam, die senkrecht zur potenziellen Rissebene verlaufen [NIEMI 1995]. Diese Spannungen müssen nicht unbedingt mit den Hauptspannungen identisch sein. Sie werden zur Abgrenzung von den Hauptspannungen als sog. primäre Spannungen bezeichnet. Aufgrund der Rissinitiierung bei den Hohlprofilknoten im Bereich des Schweißnahtübergangs entsprechen also die Strukturspannungen den Spannungen, deren Wirkungsrichtung senkrecht zum Schweißnahtübergang verläuft, siehe Bild 5-6.

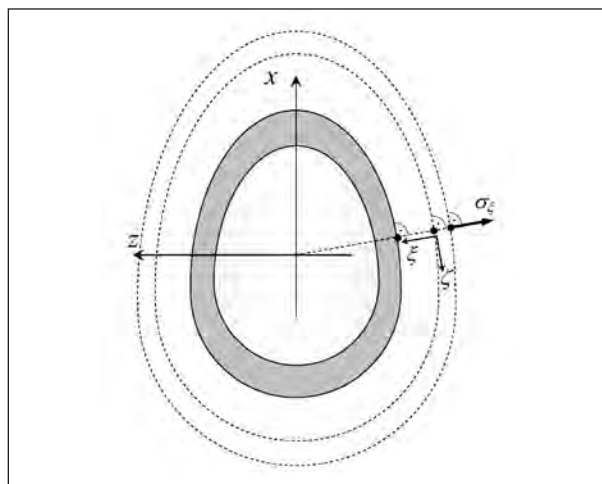


Bild 5-6: Primäre Spannung am Schweißnahtübergang mit Extrapolationspfaden

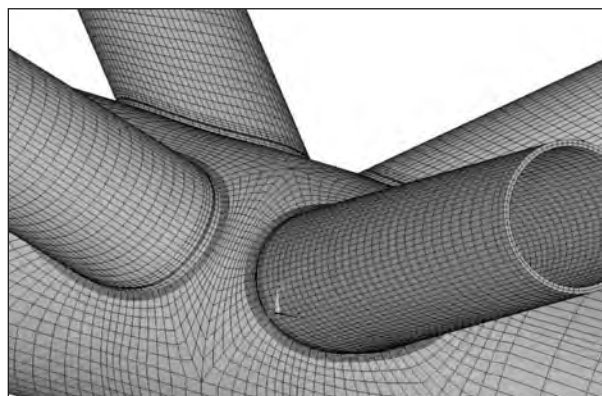


Bild 5-7: FE-Modell – Isometrie

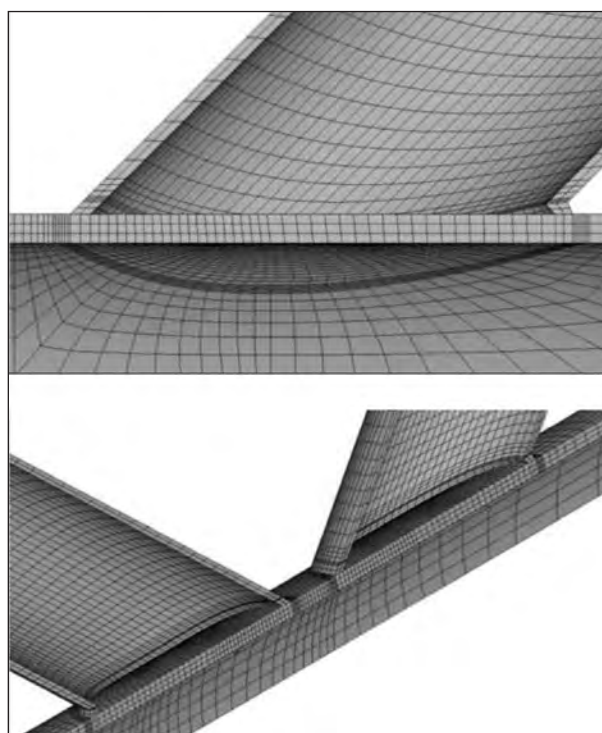


Bild 5-8: FE-Modell – Schnitt durch Krone, Nahtform B

Die primären Spannungen können mit Hilfe der bekannten Regeln [DALLY, RILEY 1991] zur Spannungstransformation aus dem Spannungstensor ermittelt werden.

$$\begin{aligned} \sigma_{\xi\xi} = & \sigma_x \cdot \cos^2(\xi, x) + \sigma_y \cdot \cos^2(\xi, y) + \sigma_z \cdot \cos^2(\xi, z) \\ & + 2 \cdot \tau_{xy} \cdot \cos(\xi, x) \cdot \cos(\xi, y) \\ & + 2 \cdot \tau_{xz} \cdot \cos(\xi, x) \cdot \cos(\xi, z) \\ & + 2 \cdot \tau_{yz} \cdot \cos(\xi, y) \cdot \cos(\xi, z) \end{aligned} \quad (5.2)$$

mit  $\sigma_x, \sigma_y, \sigma_z, \tau_{xy}, \tau_{yz}, \tau_{xz}$  als den Spannungskomponenten aus der FE-Rechnung und  $\cos(\xi, x), \cos(\xi, y), \cos(\xi, z)$  als den Richtungskosinussen für die Richtung senkrecht zum Schweißnahtübergang.

## 5.6 Verifizierung des FE-Modells

### 5.6.1 Vorbemerkung

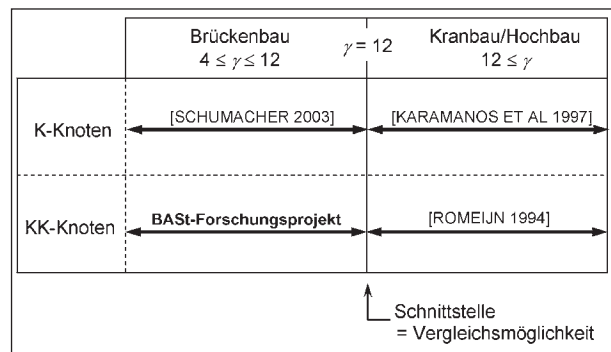
Die Kalibrierung einer numerischen Berechnung an experimentellen Daten ist eine unerlässliche Maßnahme zur Sicherstellung der Zuverlässigkeit der erhaltenen Ergebnisse. Im Rahmen dieses Forschungsvorhabens war es nicht möglich, eigene Versuche durchzuführen. Daher musste in diesem Fall eine Validierung über einen Abgleich mit bestehenden SCF-Daten durchgeführt werden, die an Versuchen validiert wurden.

Als Basis der Validierung wurden die SCF-Werte aus den Arbeiten von [KARAMANOS et al. 1997] und [SCHUMACHER 2003] zu K-Knoten herangezogen. Zwar wurden in [KARAMANOS et al. 1997] auch SCF-Werte für KK-Knoten ermittelt, allerdings liegen diese nur in Form von Erhöhungsfaktoren für die Sattelbereiche und nur für ausgewählte Lastfälle vor.

Die in [KARAMANOS et al. 1997] und [SCHUMACHER 2003] ermittelten SCF-Werte wurden jeweils durch eine entsprechende Versuchsreihe verifiziert. Die SCF-Werte von [KARAMANOS et al. 1997] wurden durch die Trägerversuche mit KK-Knoten von [ROMEIJN 1994] validiert.

### 5.6.2 Vergleichsmöglichkeiten

Aus [KARAMANOS et al. 1997] liegen SCF-Werte zu hoch- bzw. kranbautypischen K-Knoten mit Gurtschlankheiten  $\gamma \geq 12$  vor. Im Gegensatz dazu gibt [SCHUMACHER 2003] SCF-Werte für K-Knoten mit brückenbautypischen Gurtschlankheiten von  $4 \leq \gamma \leq 12$  an. Beide Arbeiten und dieses For-



**Bild 5-9:** Überschneidung der Untersuchungsgebiete

schungsvorhaben überschneiden sich im Bereich einer Gurtschlankheit von  $\gamma = 12$ , sodass an dieser Stelle eine Vergleichsmöglichkeit besteht, Bild 5-9.

Sowohl von [SCHUMACHER 2003] als auch von [ROMEIJN 1994] wurden ausschließlich Trägerversuche durchgeführt, in denen die K- bzw. KK-Knoten einer kombinierten Normalkraft-Momenten-Belastung ausgesetzt waren. Daher können im Folgenden die im Rahmen dieses Forschungsvorhabens berechneten SCF-Werte für die Elementarlastfälle nicht unmittelbar Versuchsergebnissen gegenübergestellt werden, sondern müssen mit den von [KARAMANOS et al. 1997] und [SCHUMACHER 2003] numerisch ermittelten SCF-Werten verglichen werden.

### 5.6.3 Grenzen der Vergleichbarkeit

Der Abgleich der SCF-Werte kann aufgrund leichter Abweichungen zwischen den Modellierungen der einzelnen Literaturstellen nicht zu einer vollständigen Übereinstimmung führen.

Die in [KARAMANOS et al. 1997] untersuchten K-Knoten besaßen alle in Gurtlängsrichtung keine Ausmitte. Des Weiteren wich die Form der untersuchten Schweißnahtprofile von der in Bild 2-15 und Bild 2-16 empfohlenen Ausführung ab, vergleiche Bild 5-10.

Aus der Arbeit von [SCHUMACHER 2003] wurden die Modelle a5\_125, a6\_125, b5\_125 und b6\_125 zu Vergleichszwecken herangezogen. Alle diese Knotenmodelle wiesen Ausmitten in Gurtlängsrichtung unterschiedlicher Größe auf:  $e/d_0 = -0,10$  bis  $0,20$ . Wie bereits in Kapitel 3.4.5 erwähnt verzichtete [SCHUMACHER 2003] auf kompensierende Gurtmomente. Des Weiteren betrug die Gurtschlankheit dieser Modelle  $\gamma = 12,7$ . Einen Eindruck der modellierten Schweißnahtformen vermittelt Bild 5-11.

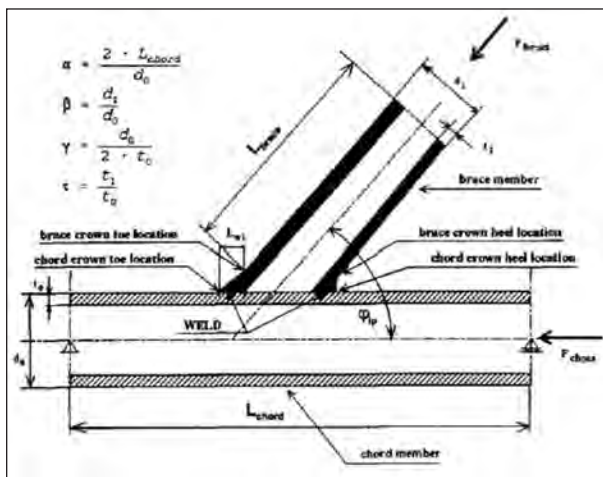


Bild 5-10: Schweißnahtmodellierung aus [ROMEIJN 1994]

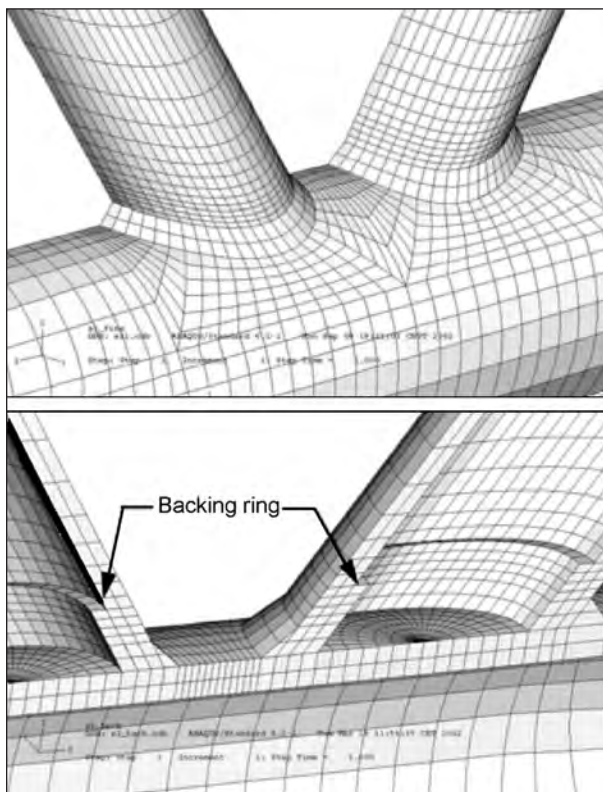


Bild 5-11: Schweißnahtmodellierung aus [SCHUMACHER 2003]

Ziel des Abgleichs der SCF-Werte war es daher zu zeigen, dass die gewählte Diskretisierung des modellierten KK-Knotens ausreichend fein ist, um zu vergleichbaren Ergebnissen mit [SCHUMACHER 2003] und [KARAMANOS et al. 1997] zu gelangen. Aus diesem Grunde wurden im Rahmen dieser vergleichenden Studie folgende Modifikationen des generierten KK-Knotenmodells vorgenommen:

1. Es wurde ein Schweißnahtprofil implementiert, das annähernd dem von [KARAMANOS et al.

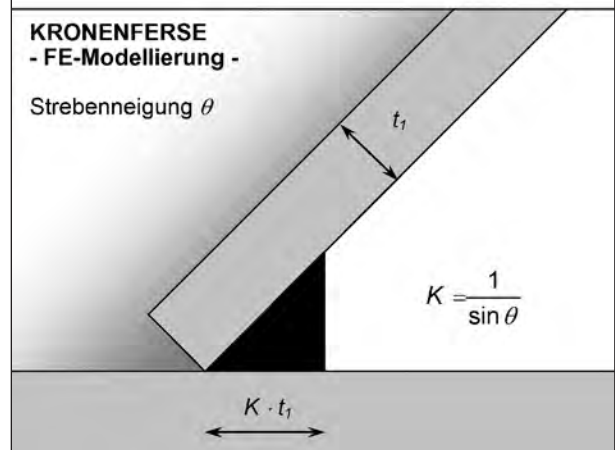
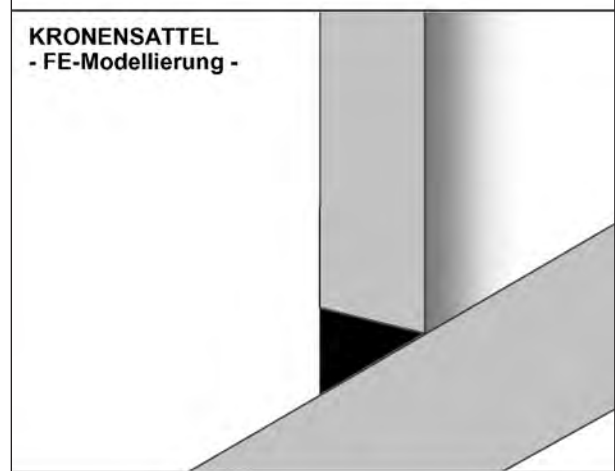
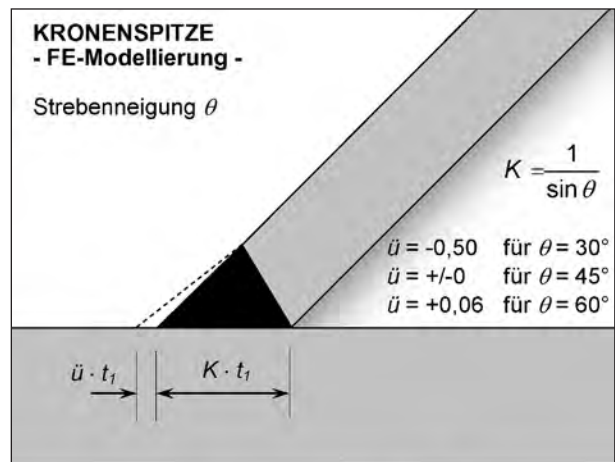


Bild 5-12: Angenähertes Schweißnahtprofil nach [ROMEIJN 1994]

1997] entspricht, vergleiche Bild 5-10 und Bild 5-12.

2. Der modellierte KK-Knoten wurde nicht durch ein Eliminieren zweier Streben in einen K-Knoten umgewandelt. Er wurde vielmehr als KK-Knoten belassen, aber dafür nur auf zwei Streben belastet. Die Abweichungen zwischen einem reinen K-Knoten und einem KK-Knoten

mit K-Knoten-Belastung werden in [KARAMANOS et al. 1997] als gering beschrieben. Die Abweichungen haben ihre Ursache in der versteifenden Wirkung der zusätzlichen unbelasteten Streben.

3. Alle untersuchten Knotengeometrien wiesen wie in [KARAMANOS et al. 1997] keine Ausmitte in Gurtlängsrichtung auf.
4. In [KARAMANOS et al. 1997] liegen neben den Strebenneigungen  $\theta = 45^\circ$  und  $\theta = 60^\circ$  auch SCF-Werte für  $\theta = 30^\circ$  vor. Zum Aufzeigen von Tendenzen erschien es wichtig, auch die SCF-Werte für diese Strebenneigung im Zuge der Verifizierung zu berechnen, auch wenn diese Strebenneigung nicht zum Untersuchungsumfang dieser Parameterstudie gehört.

**5.6.4 Gurtnormalkraft**

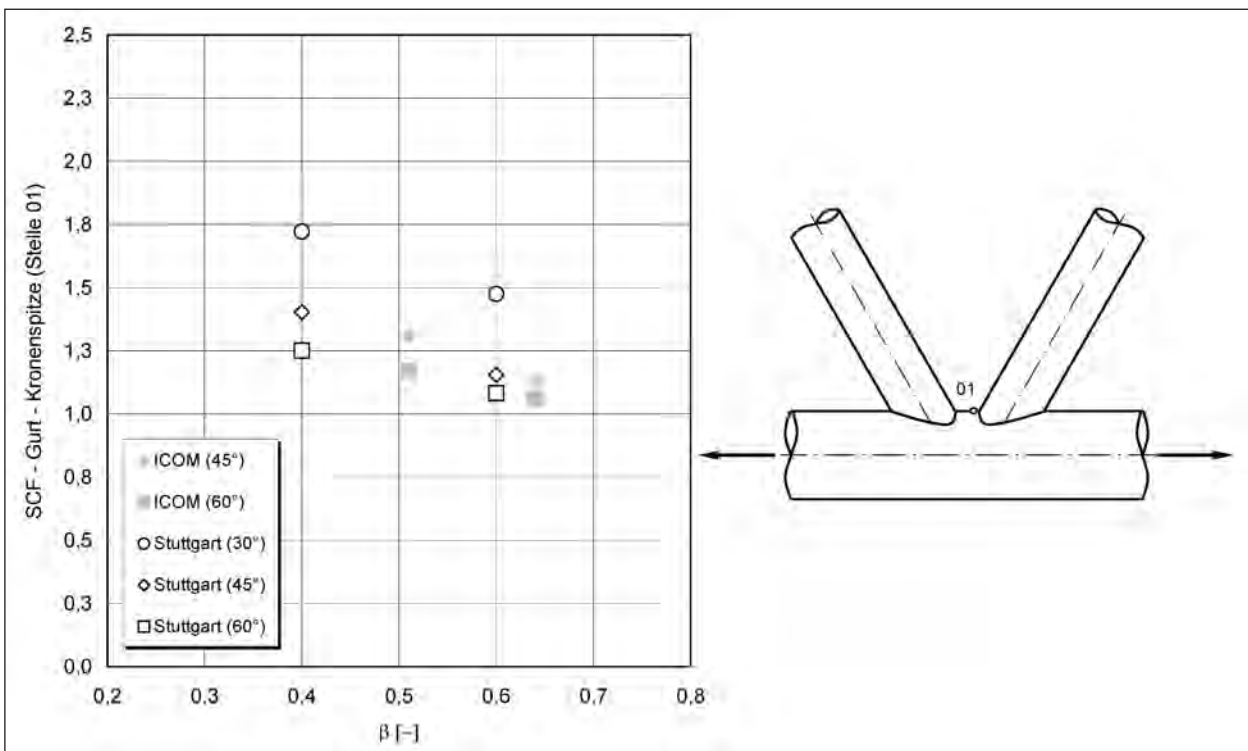
**Vorbemerkung**

In [KARAMANOS et al. 1997] werden allgemein SCF-Werte für den Kronenbereich des Gurts unter Gurtbelastung angegeben. Hierbei wird nicht unterschieden, ob es sich bei dieser Belastung um eine Gurtnormalkraft oder ein Gurtbiegemoment handelt. Die SCF-Werte müssen daher zuerst hinsichtlich des tatsächlichen Auswertungsortes bewertet

werden. Hierzu wurden die Untersuchungen von [ROMEIJN 1994], S. 124 an Y-Knoten herangezogen, da bei einer Gurtbelastung sich ein K-Knoten näherungsweise wie ein Y-Knoten verhält. Für den Y-Knoten lassen sich die Untersuchungen von [ROMEIJN 1994] wie folgt zusammenfassen:

- Die SCF-Werte in der Strebe sind vernachlässigbar.
- Die maximalen SCF-Werte im Gurt werden unter Gurtbiegung erreicht. Für eine Gurtnormalkraft stellen sich ca. 10 % geringere Werte ein.
- Die Stelle mit dem höchsten SCF-Wert im Gurt ist die Kronenferse (Stelle 05). Die Werte an der Kronenspitze (Stelle 01) sind um ca. 20 bis 25 % geringer.

Aufgrund dieser zusammenfassenden Betrachtung zum Y-Knoten und durch eigene Rechnungen kann geschlossen werden, dass die in [KARAMANOS et al. 1997] angegebenen SCF-Werte nur exakt für die Kronenferse bei Gurtbiegung gelten. Für die Gurtspitze unter Gurtnormalkraft oder -biegung bzw. für die Kronenferse unter Gurtnormalkraft stellen sie eine konservative Abschätzung dar. Die SCF-Werte nach [KARAMANOS et al. 1997] wurden daher nicht bei diesem Lastfall zu Vergleichszwecken herangezogen.



**Bild 5-13:** SCF-Werte für Lastfall 1: Gurtnormalkraft, Stelle 01 (Kronenspitze)

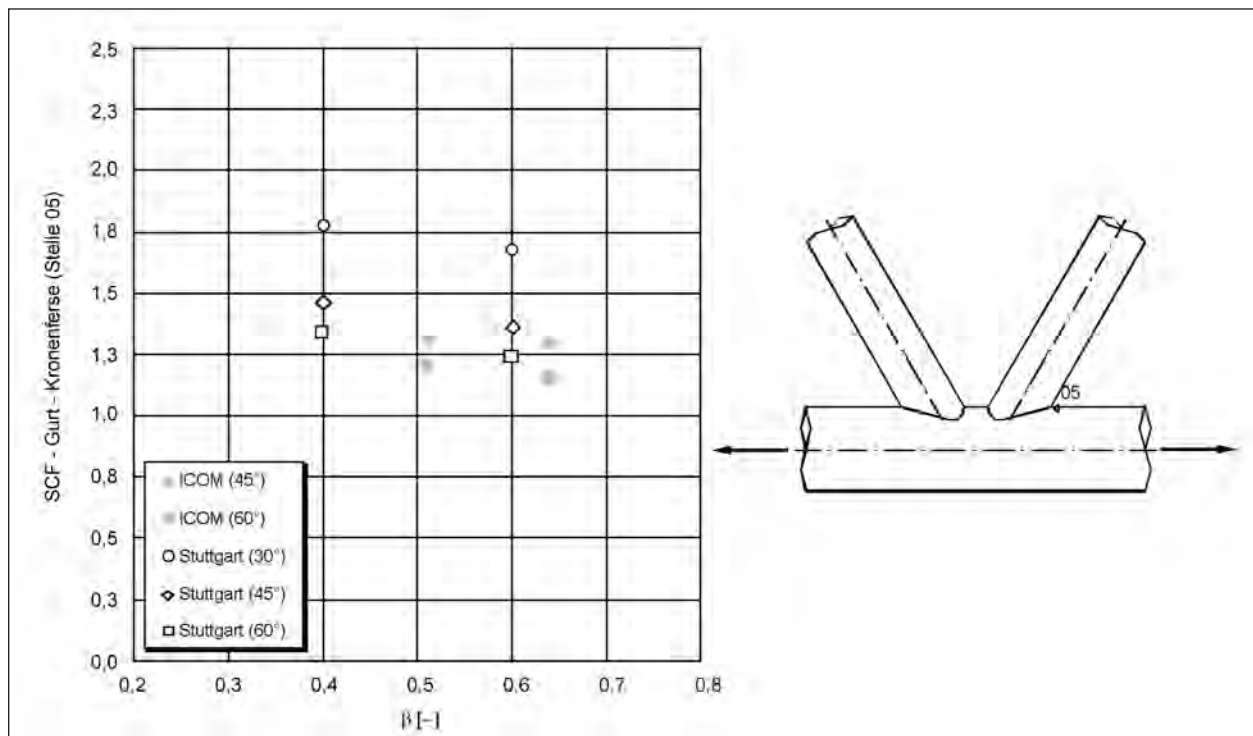


Bild 5-14: SCF-Werte für Lastfall 1: Gurtnormalkraft, Stelle 05 (Kronenferse)

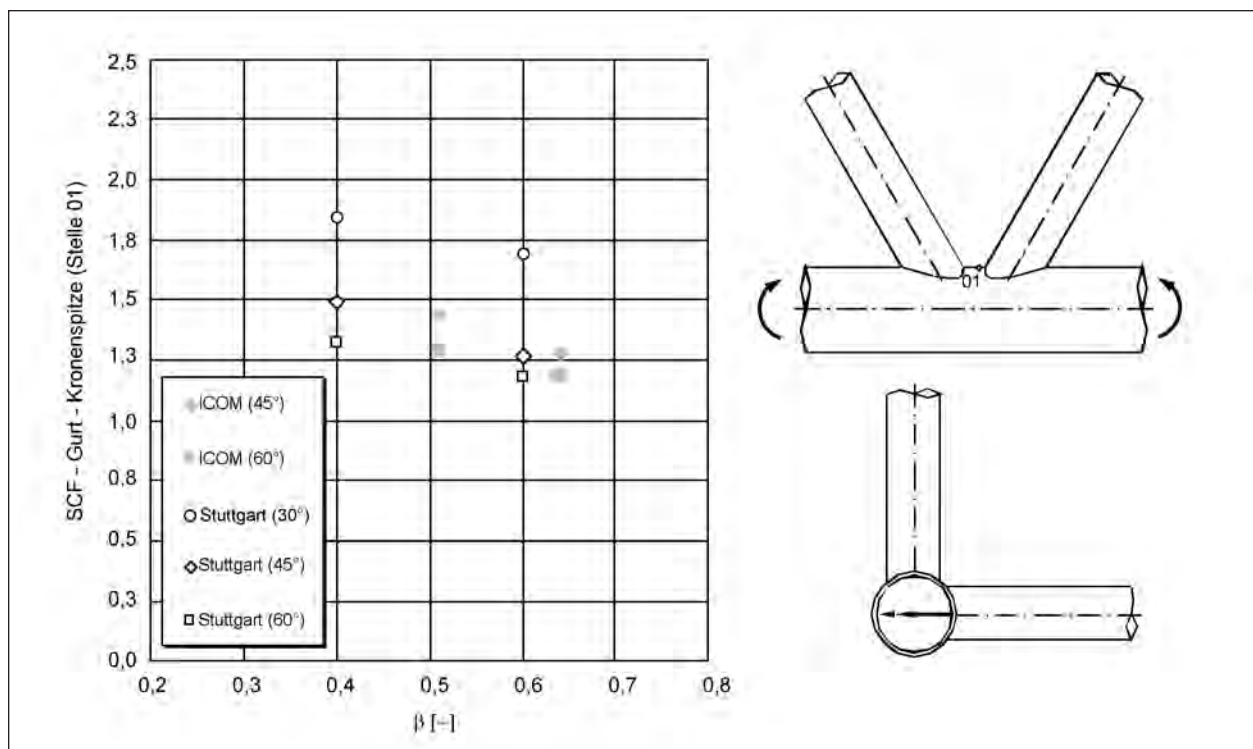


Bild 5-15: SCF-Werte für Lastfall 2: Gurtbiegung in der Ebene, Stelle 01 (Kronenspitze)

## Gurt

Die maximalen SCF-Werte treten in Analogie zum Y-Knoten an der Kronenferse (Stelle 05) auf, vgl. Bild 5-14. Die errechneten Werte stimmen gut mit denen aus [SCHUMACHER 2003] überein. Die

SCF-Werte nehmen mit abnehmender Strebenneigung zu. Die SCF-Werte an der Kronenspitze (Stelle 01) fallen um ca. 10 % geringer aus, vgl. Bild 5-13.

## Strebe

Die SCF-Werte für die Strebe sind kleiner als 1,0 und daher nicht von Bedeutung.

### 5.6.5 Gurtbiegung in der Ebene (ipb)

#### Vorbemerkung

Siehe Vorbemerkung zu Kapitel 5.6.4.

#### Gurt

Bei einer Strebenneigung von 45° und 60° treten die maximalen SCF-Werte in Analogie zum Y-Knoten an der Kronenferse (Stelle 05) auf. Die errechneten Werte für die Kronenferse liegen zwischen denen von [SCHUMACHER 2003] und denen aus [KARAMANOS et al. 1997]. Für die Kronenspitze (Stelle 01) wurden leicht höhere Werte (10 %) als in [SCHUMACHER 2003] ermittelt, vgl. Bild 5-15 und Bild 5-16.

Für eine Strebenneigung von 30° wurden im Vergleich zu [KARAMANOS et al. 1997] an der Kronenferse ca. 25 % geringere SCF-Werte ermittelt, vgl. Bild 5-16.

## Strebe

Die SCF-Werte für die Strebe sind kleiner als 1,0 und daher nicht von Bedeutung.

### 5.6.6 Strebennormalkraft

#### Vorbemerkung

Zu Vergleichszwecken stehen SCF-Werte von [KARAMANOS et al. 1997] für eine Strebenneigung von 30°, 45° (nur für Sattlbereich) und 60° und von [SCHUMACHER 2003] für eine Strebenneigung von 45° und 60° zur Verfügung.

#### Gurt

Bei einer Strebenneigung von 45° und 60° treten die maximalen SCF-Werte an der Kronenspitze (Stelle 01) auf, vgl. Bild 5-17. Die errechneten SCF-Werte stimmen gut mit denen aus [KARAMANOS et al. 1997] überein. Zu den Ergebnissen in [SCHUMACHER 2003] bestehen größere Abweichungen.

Die errechneten SCF-Werte für den Sattel (Stelle 03) stimmen gut mit denen aus [KARAMANOS et al. 1997] und aus [SCHUMACHER 2003] überein, wobei die ersteren besser angenähert werden. Vgl. Bild 5-18.

Bei einer Strebenneigung von 30° stimmen die errechneten SCF-Werte gut mit denen aus [KARAMANOS et al. 1997] sowohl für die Kronenspitze (01) als auch für den Sattel (03) überein.

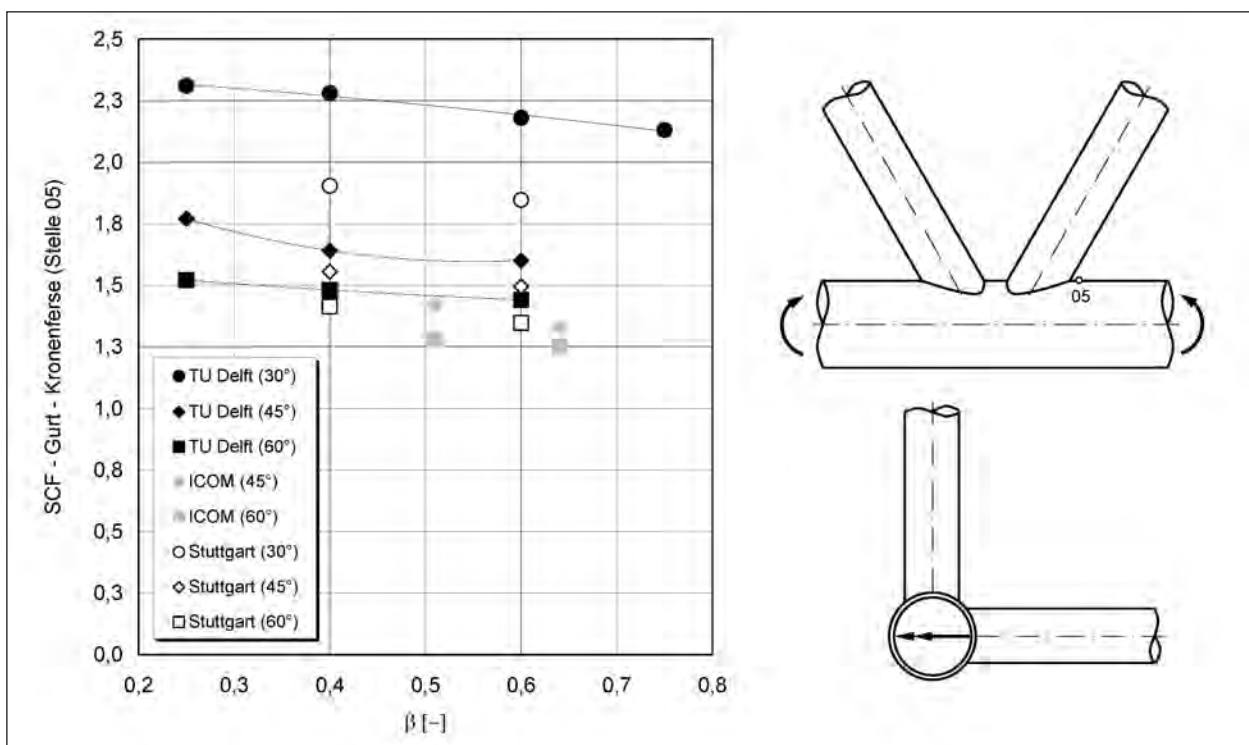


Bild 5-16: SCF-Werte für Lastfall 2: Gurtbiegung in der Ebene, Stelle 05 (Kronenferse)



### Strebe

Bei einer Strebenneigung von  $45^\circ$  und  $60^\circ$  liegen die errechneten SCF-Werte für den Sattel (13) leicht unter denen aus [KARAMANOS et al. 1997], vgl. Bild 5-19. Die entsprechenden SCF-Werte

nach [SCHUMACHER 2003] liegen teilweise bis zu 20 % über denen von [KARAMANOS et al. 1997].

Für die Kronenferse (15) werden etwa 20 % größere Werte verglichen mit [KARAMANOS et al. 1997] errechnet, vgl. Bild 5-20. Die errechneten Werte für

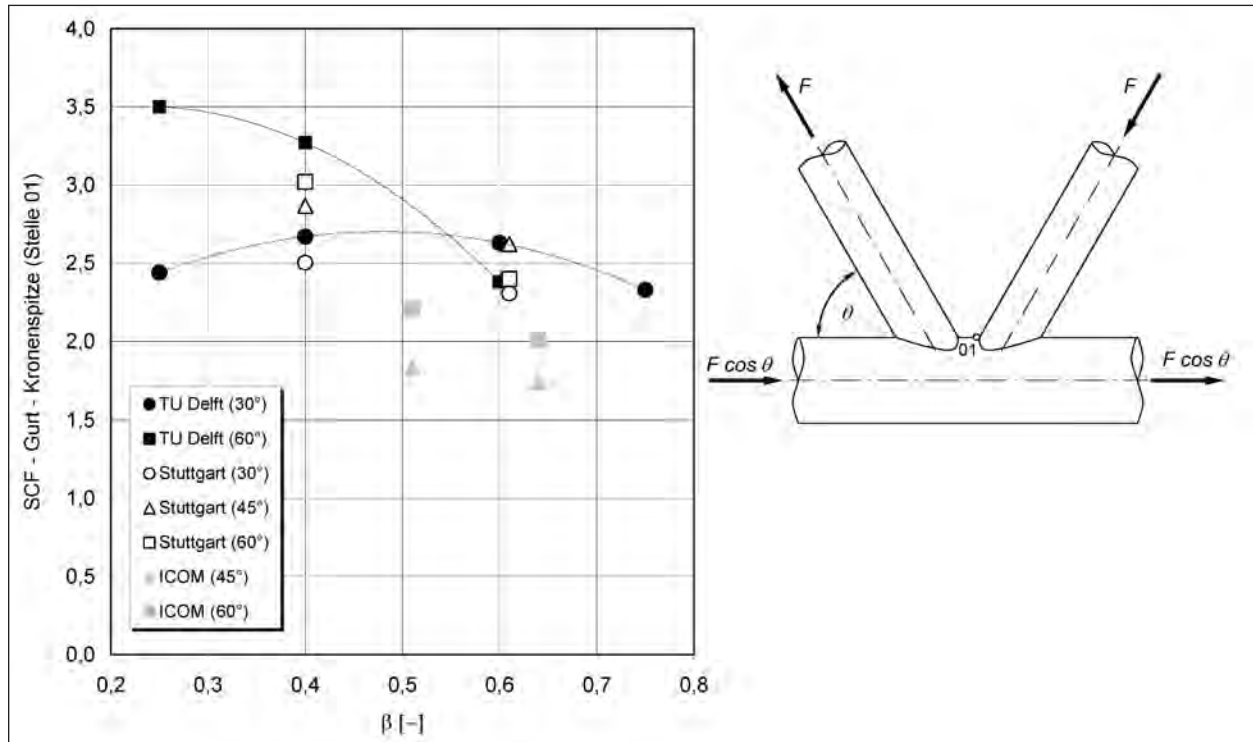


Bild 5-17: SCF-Werte für Strebenormalkraft, Gurt, Stelle 01 (Kronenspitze)

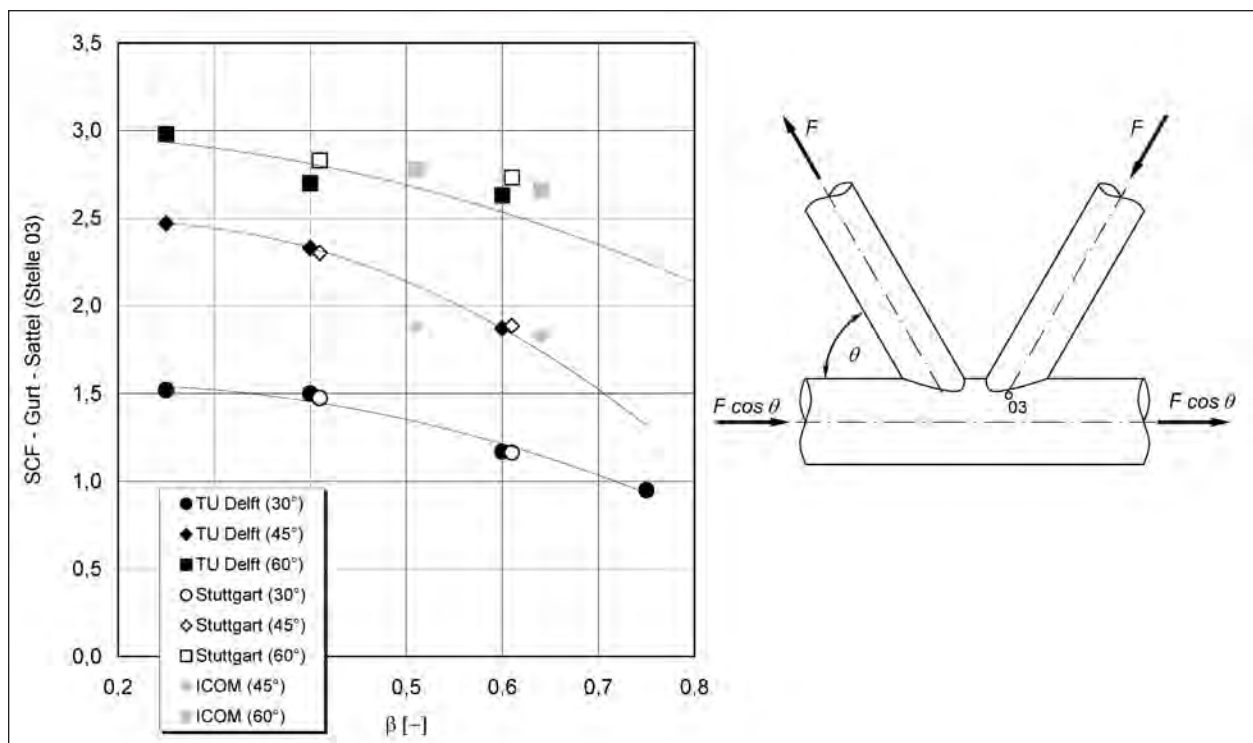


Bild 5-18: SCF-Werte für Strebenormalkraft, Gurt, Stelle 03 (Sattel)

Strebenneigungen 45° liegen zwischen denen für 30° und 60°. Die SCF-Werte nach [SCHUMACHER 2003] fallen für eine Strebenneigung von 45° nicht in diese Bandbreite.

Bei einer Strebenneigung von 30° liegen die errechneten SCF-Werte für die Kronenferse (15) und den Sattel (13) unter denen von [KARAMANOS et al. 1997].

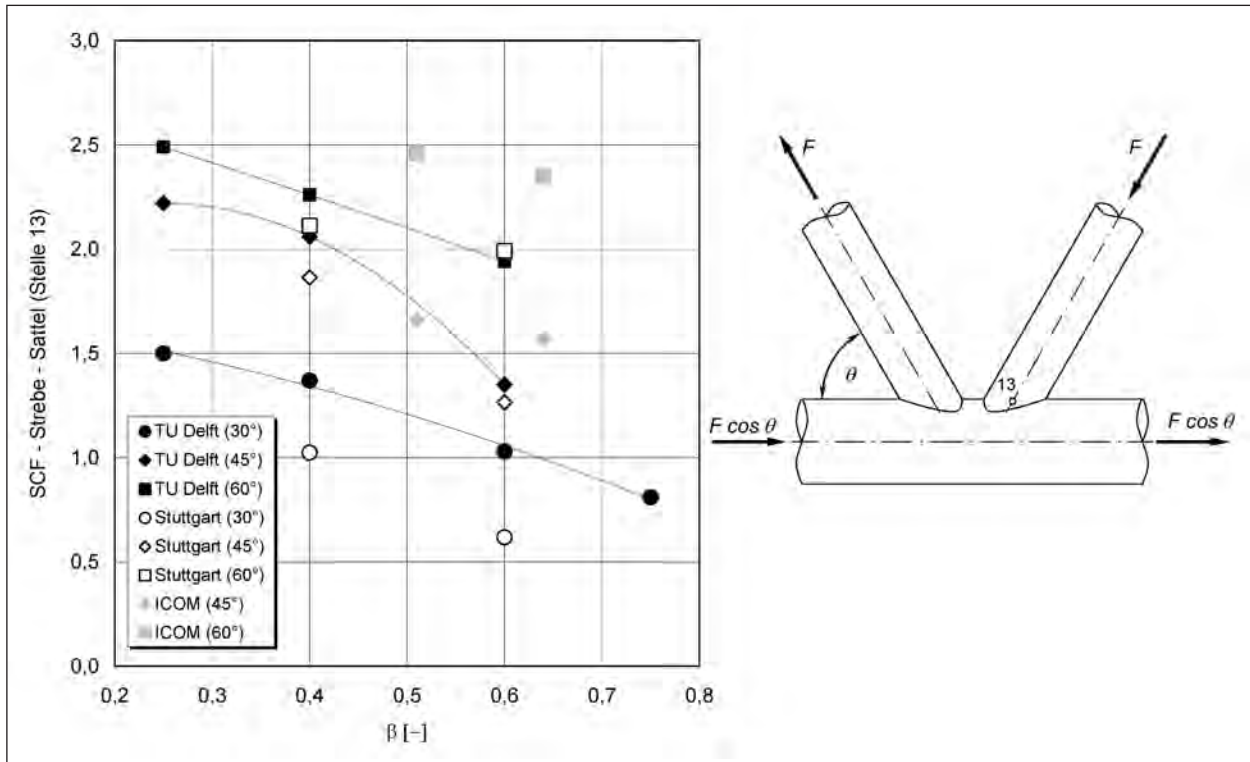


Bild 5-19: SCF-Werte für Strebenormalkraft, Strebe, Stelle 13 (Sattel)

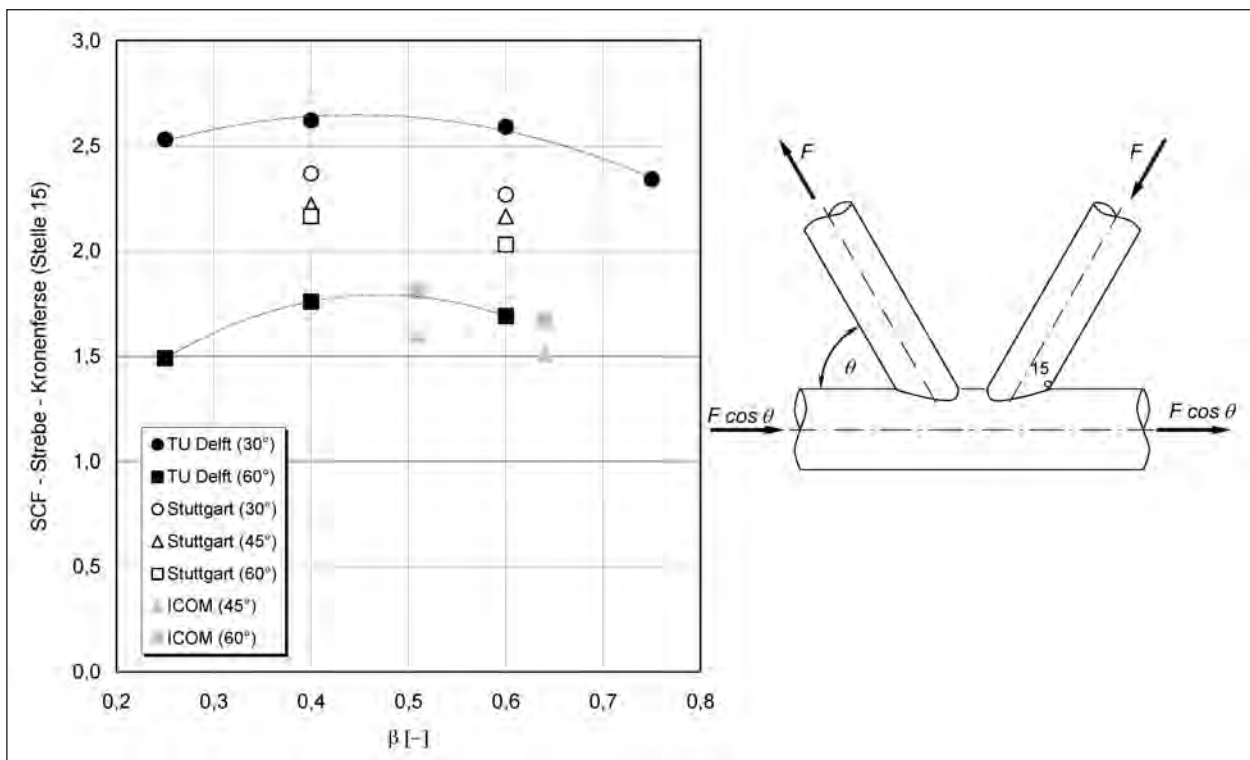


Bild 5-20: SCF-Werte für Strebenormalkraft, Strebe, Stelle 15 (Kronenferse)

### 5.6.7 Strebenbiegung in der Ebene (ipb)

#### Vorbemerkung

Zu Vergleichszwecken stehen SCF-Werte von [KARAMANOS et al. 1997] für eine Strebenneigung von 30° und 60° und von [SCHUMACHER 2003] für eine Strebenneigung von 45° und 60° zur Verfügung.

#### Gurt

Bei einer Strebenneigung von 45° und 60° treten die maximalen SCF-Werte an der Kronenspitze (Stelle 01) auf, vgl. Bild 5-21. Die errechneten SCF-Werte liegen mit ca. 20 % unter denen aus [KARAMANOS et al. 1997]. Die Werte nach [SCHUMACHER 2003] liegen bis zu 35 % unter denen von [KARAMANOS et al. 1997].

Für eine Strebenneigung von 30° stimmen die errechneten SCF-Werte für die Kronenspitze nahezu exakt mit denen aus [KARAMANOS et al. 1997] überein.

#### Strebe

Die maximalen SCF-Werte treten an der Kronenferse (Stelle 15) auf, vgl. Bild 5-22.

Bei einer Strebenneigung von 45° und 60° liegen die errechneten SCF-Werte mit ca. 25 % über denen aus [KARAMANOS et al. 1997]. Die Werte nach [SCHUMACHER 2003] weisen nahezu keinen Einfluss der Strebenneigung auf.

Für eine Strebenneigung von 30° liegen die errechneten SCF-Werte um ca. 15 % niedriger als die von [KARAMANOS et al. 1997].

### 5.6.8 Strebenbiegung aus der Ebene (opb)

#### Vorbemerkung

Zu Vergleichszwecken stehen nur SCF-Werte von [KARAMANOS et al. 1997] für eine Strebenneigung von 30°, 45° und 60° zur Verfügung.

#### Gurt

Bei einer Strebenneigung von 30°, 45° und 60° treten die maximalen SCF-Werte am Sattel (Stelle 03) auf, vgl. Bild 5-23. Die errechneten SCF-Werte liegen mit bis zu 25 % über den Werten von [KARAMANOS et al. 1997].

#### Strebe

Bei einer Strebenneigung von 45° und 60° treten die maximalen SCF-Werte am Sattel (Stelle 13)

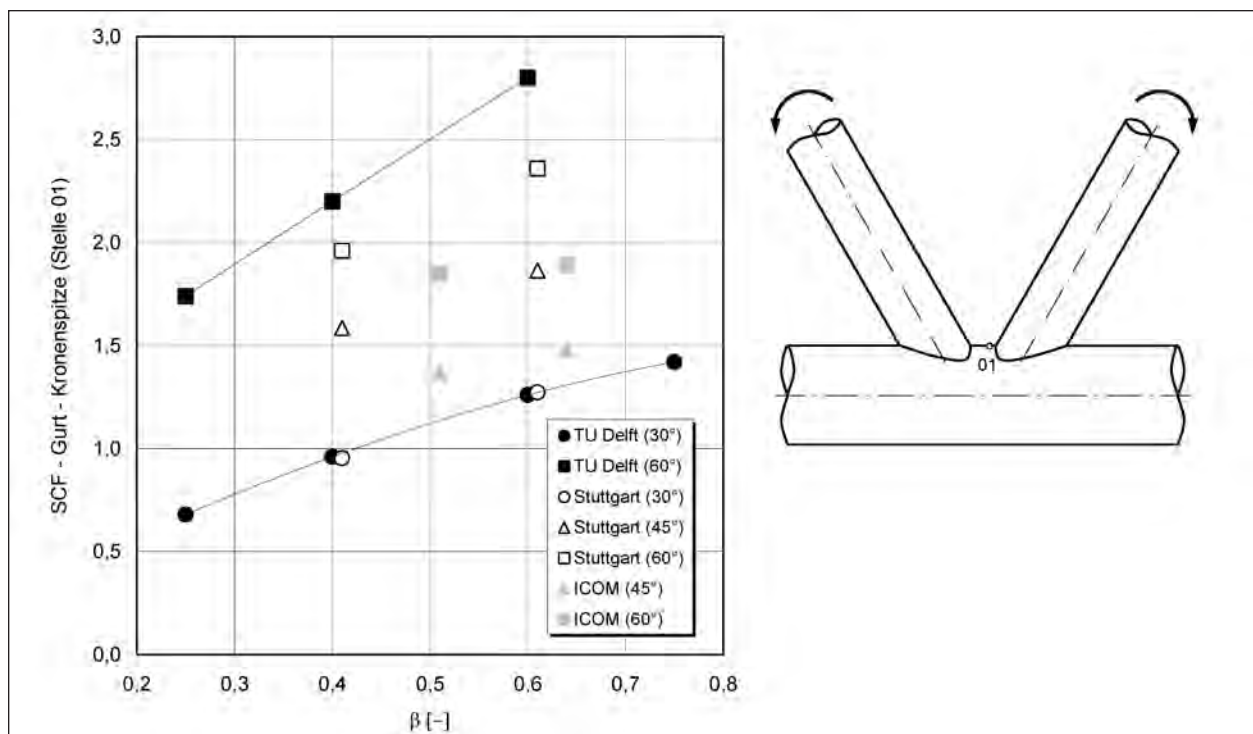


Bild 5-21: SCF-Werte für Strebenbiegung in der Ebene, Gurt, Stelle 01 (Kronenspitze)

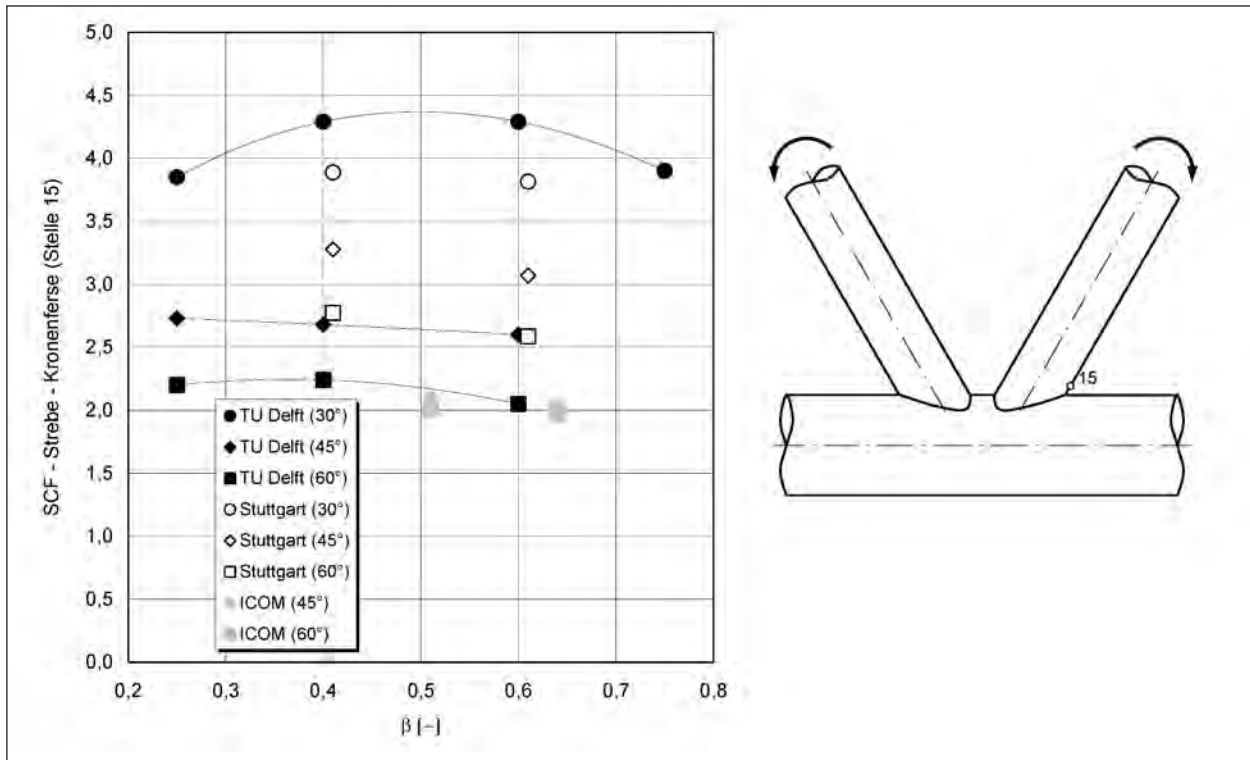


Bild 5-22: SCF-Werte für Strebenbiegung in der Ebene, Strebe, Stelle 15 (Kronenferse)

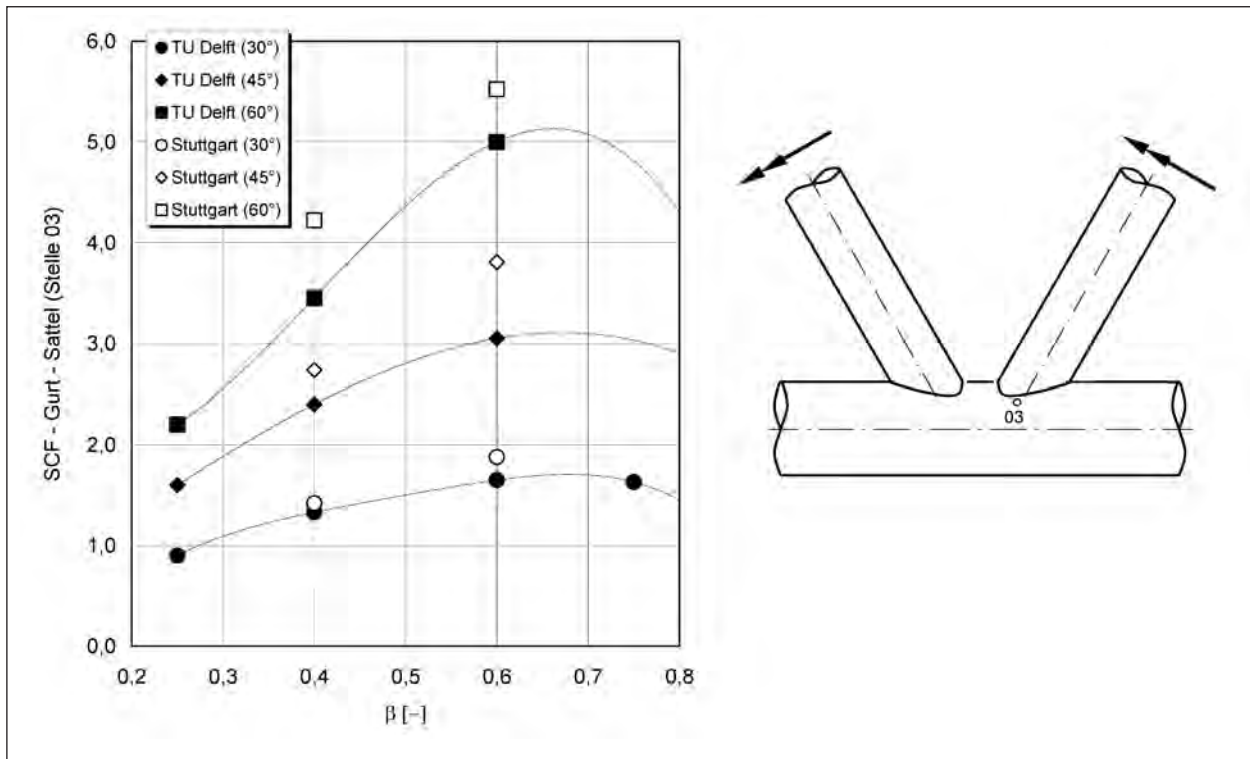


Bild 5-23: SCF-Werte für Strebenbiegung aus der Ebene, Gurt, Stelle 03 (Sattel)

auf, vgl. Bild 5-24. Die errechneten SCF-Werte liegen mit größer werdendem  $\beta$ -Wert mit bis zu ca. 35 % über denen aus [KARAMANOS et al. 1997].

Für eine Strebenneigung von 30° stimmen die errechneten SCF-Werte nahezu exakt mit denen aus [KARAMANOS et al. 1997] überein.

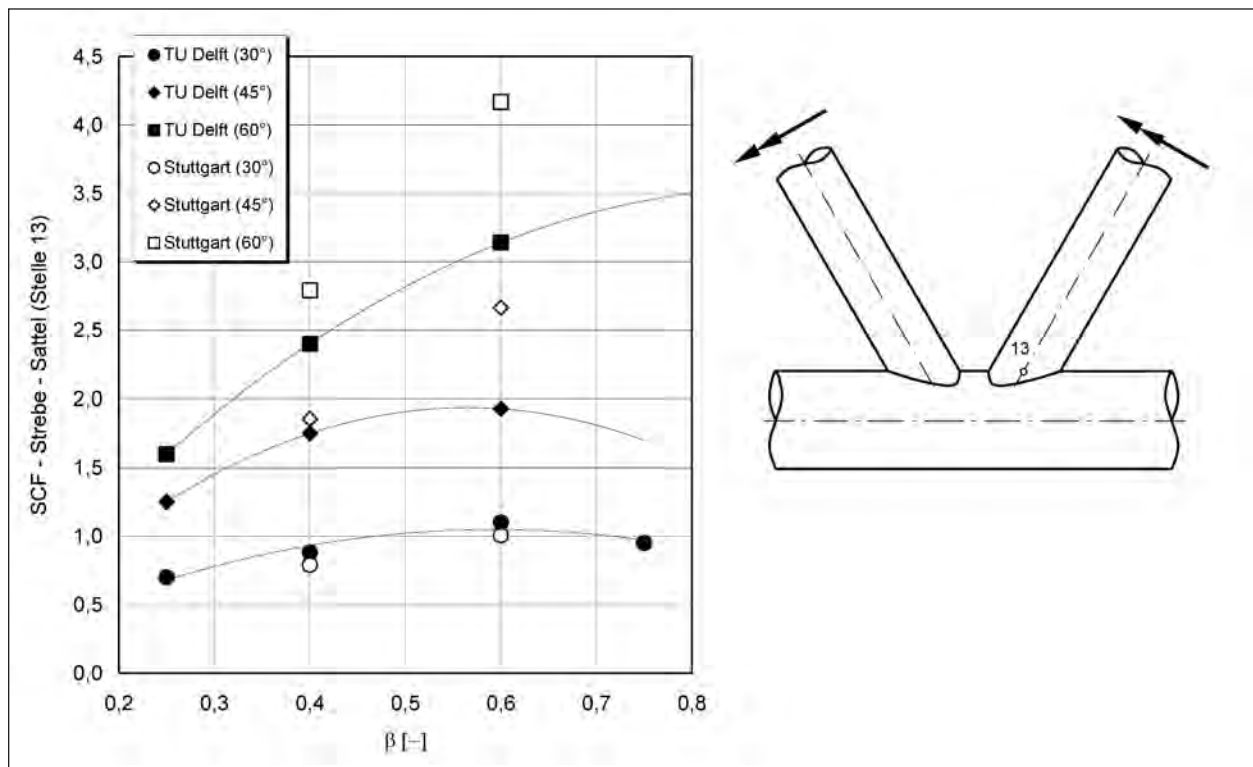


Bild 5-24: SCF-Werte für Strebenbiegung aus der Ebene, Strebe, Stelle 13 (Sattel)

### 5.6.9 Zusammenfassung

Unter den in Kapitel 5.6.3 erläuterten Randbedingungen zeigen die Vergleiche zu [KARAMANOS et al. 1997] und [SCHUMACHER 2003] gut, dass durch das generierte FE-Modell eine ausreichende Genauigkeit erreicht wird. Die Feinheit der Elementierung, wie sie auch für die Parameterstudie eingesetzt wurde, reicht also aus, um zu ähnlichen Ergebnissen wie [KARAMANOS et al. 1997] und [SCHUMACHER 2003] zu gelangen. Es kann festgestellt werden:

1. Der Abgleich der errechneten SCF-Werte mit denen aus der Literatur ist zufrieden stellend. Mit Blick auf die unterschiedlichen Voraussetzungen (Strebenexzentrizitäten, Nahtform, nur qualitative Angaben zum Nahtprofil etc.) sind die auftretenden Unterschiede verständlich.
2. Des Weiteren kann festgehalten werden, dass die Nahtform und das Nahtvolumen, die in [KARAMANOS et al. 1997] und [SCHUMACHER 2003] unterschiedlich modelliert wurden, einen wesentlichen Einfluss auf die Strukturspannung besitzen.

Aus dieser Erkenntnis kann der Schluss gezogen werden, dass die Angabe der SCF-Werte mit einer detaillierten Beschreibung der Schweißkantenvor-

bereitung und der Nahtausbildung einhergehen muss. Ein Verweis auf die zur Verfügung stehenden Ausführungsnormen erscheint nicht ausreichend, da die vorhandenen Regelwerke, wie im Kapitel 2.6.2 gezeigt wurde, zu große Freiräume lassen.

Schließlich kann festgestellt werden, dass durch die Vergleiche das der Parameterstudie zugrunde liegende FE-Modell im Rahmen der Möglichkeiten validiert wurde.

## 5.7 SCF-Verläufe

### 5.7.1 Parameterstudie

Im Rahmen einer Parameterstudie wurden die SCF-Werte für 36 verschiedene Geometrien für die in Kapitel 3.4.5 beschriebenen 18 Elementarlastfälle ermittelt. In Tabelle 5-2 sind die Kennwerte der Parameterkombinationen hinterlegt. Für jede einzelne Geometrie wurden zwei unterschiedliche Nahtformen und zwei unterschiedliche Spaltmaße  $g_L$  untersucht. Somit wurden insgesamt 2.592 FE-Berechnungen durchgeführt.

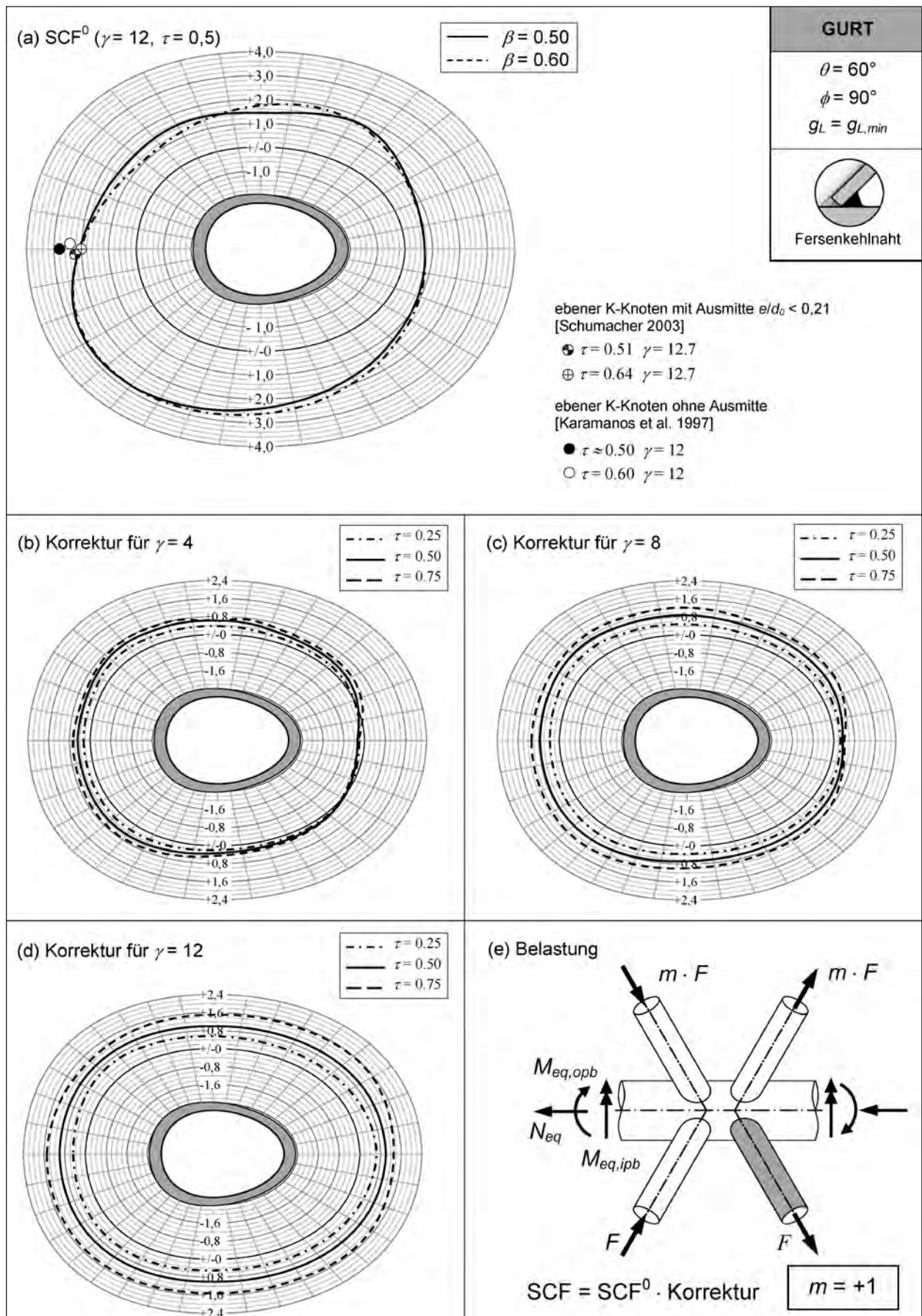
### 5.7.2 SCF-Verläufe

Die SCF-Werte wurden an den Streben-Gurt-Verschneidungen sowohl im Gurt als auch in den Stre-

Nr.	$\theta$ [°]	$\beta$	$\gamma$	$\tau$	$\phi$ [°]	$d_o$ [mm]	$t_o$ [mm]	$d_i$ [mm]	$t_i$ [mm]
1	45	0,5	4	0,25	90	400	50,00	200	12,50
2	60	0,5	4	0,25	90	400	50,00	200	12,50
3	45	0,6	4	0,25	90	400	50,00	240	12,50
4	60	0,6	4	0,25	90	400	50,00	240	12,50
5	45	0,5	8	0,25	90	400	25,00	200	6,25
6	60	0,5	8	0,25	90	400	25,00	200	6,25
7	45	0,6	8	0,25	90	400	25,00	240	6,25
8	60	0,6	8	0,25	90	400	25,00	240	6,25
9	45	0,5	12	0,25	90	400	16,67	200	4,17
10	60	0,5	12	0,25	90	400	16,67	200	4,17
11	45	0,6	12	0,25	90	400	16,67	240	4,17
12	60	0,6	12	0,25	90	400	16,67	240	4,17
13	45	0,5	4	0,5	90	400	50,00	200	25,00
14	60	0,5	4	0,5	90	400	50,00	200	25,00
15	45	0,6	4	0,5	90	400	50,00	240	25,00
16	60	0,6	4	0,5	90	400	50,00	240	25,00
17	45	0,5	8	0,5	90	400	25,00	200	12,50
18	60	0,5	8	0,5	90	400	25,00	200	12,50
19	45	0,6	8	0,5	90	400	25,00	240	12,50
20	60	0,6	8	0,5	90	400	25,00	240	12,50
21	45	0,5	12	0,5	90	400	16,67	200	8,33
22	60	0,5	12	0,5	90	400	16,67	200	8,33
23	45	0,6	12	0,5	90	400	16,67	240	8,33
24	60	0,6	12	0,5	90	400	16,67	240	8,33
25	45	0,5	4	0,75	90	400	50,00	200	37,50
26	60	0,5	4	0,75	90	400	50,00	200	37,50
27	45	0,6	4	0,75	90	400	50,00	240	37,50
28	60	0,6	4	0,75	90	400	50,00	240	37,50
29	45	0,5	8	0,75	90	400	25,00	200	18,75
30	60	0,5	8	0,75	90	400	25,00	200	18,75
31	45	0,6	8	0,75	90	400	25,00	240	18,75
32	60	0,6	8	0,75	90	400	25,00	240	18,75
33	45	0,5	12	0,75	90	400	16,67	200	12,50
34	60	0,5	12	0,75	90	400	16,67	200	12,50
35	45	0,6	12	0,75	90	400	16,67	240	12,50
36	60	0,6	12	0,75	90	400	16,67	240	12,50

Tab. 5-2: Untersuchte Parameterkombinationen

ben an 180 Stellen über den jeweiligen Umfang ausgewertet, sodass die Darstellung der Verläufe der SCF-Werte über den Umfang der Verschneidung möglich ist, vgl. Bild 5-25. Eine verdichtete Darstellung für acht Stellen über den Umfang wurde bereits in Form von Bemessungsdiagrammen im Kapitel 3.5 vorgestellt. Die kompletten SCF-Verläufe werden in [KUHLMANN, EULER 2008] wiedergegeben.



## 6 Ausführungsempfehlungen

### 6.1 Vorbemerkung

Um sicherzustellen, dass die getroffenen Annahmen beim Nachweis der Ermüdung zutreffen, ist eine konsequente Qualitätssicherung erforderlich. In diesem Kapitel werden die wesentlichen Qualitätssicherungsmaßnahmen zusammengefasst. Soweit für einzelne Maßnahmen eine normative Regelung besteht, wird auf das entsprechende Regelwerk verwiesen.

### 6.2 Anforderungen an den Schweißbetrieb

Hinsichtlich der Anforderungen an den die Schweißarbeiten ausführenden Betrieb gelten die Regeln bezüglich der Herstellerqualifikation nach DIN 18800 Teil 7, Klasse E.

#### 6.2.1 Schweißerprüfung

Geschweißte Hohlprofilverbindungen (Hohlprofilknoten und Stumpfstöße) erfordern eine erweiterte Schweißerprüfung. Die Schweißerprüfung nach DIN EN 287 ist in Anlehnung an die Regeln nach DIN 18808 [DIN 18808:1984-10] für vorwiegend ruhend beanspruchte Hohlprofilkonstruktionen um entsprechende Prüfstücke zu erweitern.

Für Hohlprofilknoten wird darüber hinaus eine Zusatzprüfung gefordert [DVS 1704]. An zwei Prüfstücken gemäß DIN 18808 (siehe Bild 6-1) muss der Schweißer seine Befähigung zum Rohrschweißen nachweisen.

Alternativ zu den in [DIN 18808] vorgesehenen zwei baugleichen Prüfstücken mit umlaufender Schweißnaht können zwei Prüfstücke, wie in Bild 6-2 dargestellt, geschweißt werden. Anschließend sind die Prüfstücke jeweils in einem Zerreißversuch definiert zu zerstören. Durch die schwächere Schweißnahtausbildung wird sichergestellt, dass die Prüfstücke mit üblichen Prüfeinrichtungen zerstört werden können.

#### 6.2.2 Zusätzliche Verfahrensprüfung

Die erforderlichen Verfahrensprüfungen im konstruktiven Ingenieurbau werden in DIN 18800, Teil 7 und in DIN EN 15607 geregelt. Der Prüfumfang der Verfahrensprüfung ist in DIN EN ISO 15614 beschrieben. Zusätzlich ist für Feinkornbaustähle eine

Verfahrensprüfung mit den Vorgaben nach DVS 1702 durchzuführen ( $f_y \geq 355 \text{ N/mm}^2$ ).

Da die genormten Prüfstücke der Verfahrensprüfung nach DIN EN ISO 15614 die komplizierte Schweißnahtgeometrie des KK-Knotens nicht ausreichend repräsentieren (z. B. Übergang zwischen unterschiedlichen Nahtformen, Schweißen in unterschiedlichen Schweißpositionen etc.), wird pro Bauwerk eine Verfahrensprüfung im Sinne einer vorgezogenen Arbeitsprüfung (früher: Arbeitsprobe) nach DIN EN ISO 15613 an mindestens einem ähnlichen KK-Knoten dringend empfohlen. Ähnlich heißt in diesem Zusammenhang, dass die Geometrie des Prüfstücks zur Geometrie der Fertigung in einem Verhältnis 1:1 bis 1:2 steht, um Maßstabseffekte zu erfassen.

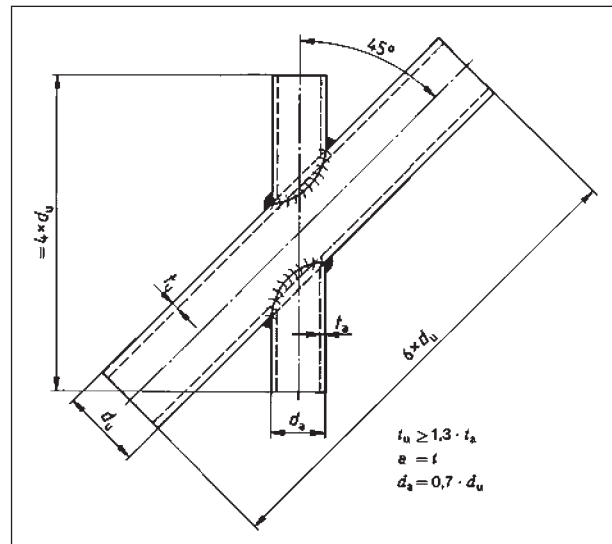


Bild 6-1: Prüfstück der Zusatzprüfung [DIN 18808]

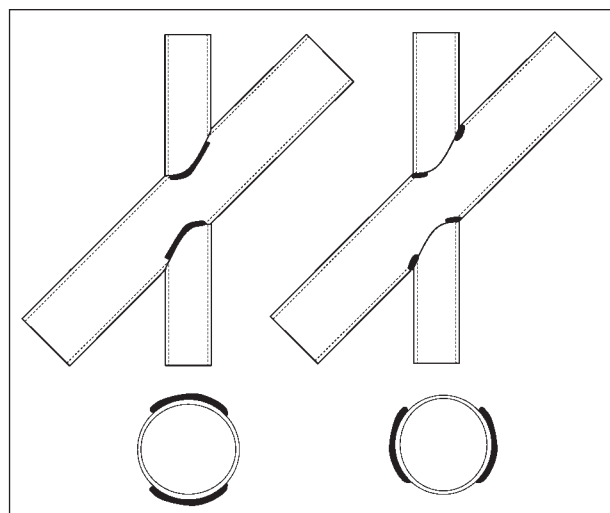


Bild 6-2: Empfohlene modifizierte Schweißnahtausbildung der Prüfstücke



### 6.3 Bewertungsgruppe

Gemäß Element (1205) in DIN 18800, Teil 7 sind bei der qualitativen Bewertung der Prüfstücke und der Fertigung aufgrund der nicht vorwiegend ruhenden Beanspruchung die zulässigen Grenzwerte der Bewertungsgruppe B nach DIN EN ISO 5817 zugrunde zu legen. Zusätzliche Anforderungen, die über das Maß der Bewertungsgruppe hinausgehen, sind:

- Ausschluss der Wurzelkerbe und des Wurzelrückfalls,
- scharfe Übergänge bei vorhandenem zulässigem Kantenversatz sind grundsätzlich abzuarbeiten,
- Schweißspritzer und Zündstellen sind in jedem Fall zu entfernen,
- weitere Anforderungen, siehe folgendes Kapitel.

### 6.4 Schweißkantenvorbereitung

#### 6.4.1 Allgemeines

Der Zuschnitt sollte automatisiert erfolgen, um eine hohe Genauigkeit zu erzielen, siehe Bild 6-3. Er kann beispielsweise durch Brennschneiden auf einer Rohrprofilbrennschneidemaschine erfolgen. Die Schweißfasenvorbereitung ist hierbei mit in den Zuschnitt zu integrieren.

Bei der Planung des Zuschnitts sind eventuelle Toleranzen der Hohlprofile wie Unrundheit etc. zu berücksichtigen. Daher sollten bei besonders hoch ermüdungsbeanspruchten Hohlprofilverbindungen die anschließenden Profile vermessen werden, um eine möglichst hohe Passgenauigkeit zu gewährleisten.

Schweißkantenvorbereitung mittels ebener Schnitte (Sägeschnitt, siehe Bild 6-4), wie sie im Hochbau



Bild 6-3: CNC-gesteuerter Brennschnitt

bei ruhender Beanspruchung vorkommen, sind wegen der höheren Kerbwirkung durch die unstete Verschneidungskurve zu vermeiden.

#### 6.4.2 Nacharbeiten des Zuschnitts

Zum Ausgleich von Passungenauigkeiten sollten die Schweißkanten nicht von Hand brenngeschnitten, sondern nur mechanisch bearbeitet (z. B. geschliffen) werden.

#### 6.4.3 Schweißbadsicherung

Schweißbadsicherungen in Form von so genannten Backing Rings sind nach Meinung der Autoren nicht empfehlenswert, da sie zwar den Schweißvorgang erleichtern (besseres Erfassen der Wurzel), gleichzeitig aber zu zusätzlichen Heftnähten im ermüdungstechnisch kritischen Bereich führen und somit unter Umständen den Ermüdungswiderstand herabsetzen, vgl. Bild 6-5.

#### 6.4.4 Schweißnahtübergänge

Die Schweißnahtübergänge an der Strebenkronen- und -ferse sollten durch geeignete Maßnahmen in ihrer Kerbwirkung reduziert werden. Zu diesen



Bild 6-4: Schweißkantenvorbereitung durch Sägeschnitte [MANG, BUCAK 1993]

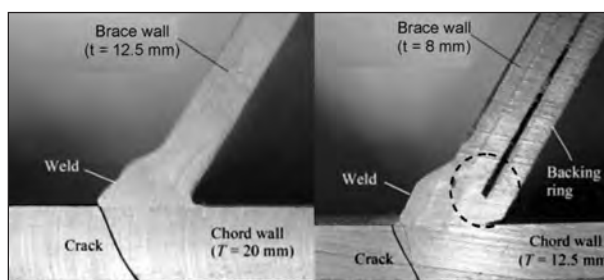


Bild 6-5: Ohne Schweißbadsicherung (links), mit Backing Ring (rechts) [SCHUMACHER 2003]

Maßnahmen zählt z. B. das Überschweißen der Nahtübergänge durch Zusatzlagen, vgl. Bild 2-13.

Eine Nachbehandlung der Nahtenden mit UIT oder HiFiT ist möglich. Die Forschungen auf diesem Gebiet der Nachbehandlung sind allerdings noch nicht abgeschlossen.

#### 6.4.5 Heftungen

Die zur Vormontage erforderlichen Heftungen sollten in Bereichen mit geringerer Ermüdungsbeanspruchung positioniert werden.

Wenn ein Vorwärmen erforderlich ist, kann auch beim Heften nicht darauf verzichtet werden. Nach dem Heftvorgang ist eine 100%-Sichtprüfung der Heftnähte nach DIN EN 970 bezüglich deren Lage auf voller Länge empfehlenswert.

Als Richtwert für das Sollmaß der Schweißkantenvorbereitung werden 2 bis 3 mm (Spaltmaß zwischen Strebe und Gurt) angesehen [DIN EN 1993-1-8:2005]. Siehe auch Bild 2-11 f.

### 6.5 Materialanforderungen

#### 6.5.1 Prüfzeugnisse

Für das Material – bei geschweißten Rohren gegebenenfalls auch für das Vormaterial – werden mindestens Prüfzeugnisse nach [DIN EN 10204:2005-01] Kapitel 3.2 (alte Bezeichnung 3.1C) unter Angabe des Gehaltes an zusätzlichen chemischen Elementen (14er Analyse) und des Kohlenstoffäquivalents nach z. B. [DIN EN 10025-1, DIN EN 10210] vorausgesetzt, siehe auch [ZTV-Ing, ARS].

Es dürfen nur Hohlprofile gemäß [DIN EN 10210] eingesetzt werden. Das bedeutet, dass beim Einsatz von kaltgefertigten Hohlprofilen eine Wärmebehandlung erforderlich ist, um eine gleichwertige metallurgische Beschaffenheit wie bei den warmgefertigten Erzeugnissen zu erzielen.

#### 6.5.2 Stahlgütewahl mit Blick auf die Bruchzähigkeit

Beim Nachweis der Kerbschlagarbeit des Rohmaterials ist gemäß Nationalem Anhang zu [DIN EN 1993-1-10] bzw. DAST-Richtlinie 009 von einem Bemessungswert der Einsatztemperatur von  $-30\text{ °C}$  auszugehen.

#### 6.5.3 Stahlgütewahl mit Blick auf besondere Anforderungen in Blechdickenrichtung

Es wird vorausgesetzt, dass die im Brückenbau eingesetzten Bleche frei von Dopplungen sind.

Die Auswahl der Stahlsorte (Z-Güte) in Hinblick auf die Eigenschaften in Dickenrichtung muss DIN EN 1993-1-10:2005 entsprechen. Die Zugversuche in Blechdickenrichtung sollten nach DIN EN 10164 mit folgenden Ergänzungen durchgeführt werden:

- Neben der Brucheinschnürung ist auch die Zugfestigkeit in Blechdickenrichtung nachzuweisen. Sie soll mindestens 80 % des Mindest-Normwertes gemäß DIN EN 10210 betragen.
- Es sollten nur Zugproben mit Verlängerungsstücken im Sinne von DIN EN 10164 geprüft werden. Die Verlängerungsstücke können z. B. geschweißte Bolzen sein, die z. B. über Bolzenschweißen mit dem Probestück verbunden werden. Aus dem so vorbereiteten Probestück sollten die Rundproben entnommen werden, siehe Bild 6-6. Die Wärmeeinflusszone durch das Anschweißen der Verlängerungsstücke sollte möglichst wenig in das Probestück hinreichen [Germanischer Lloyd II].

Anmerkung 1:

Durch diese Maßnahme wird der untersuchte Blechbereich vergrößert.

Anmerkung 2:

Bei minderwertigen Stahlblechen können mehrere Dopplungshorizonte auftreten. Es genügt daher nicht, nur die unmittelbare Blechmitte auf eine mögliche Mittenseigerung hin zu untersuchen.

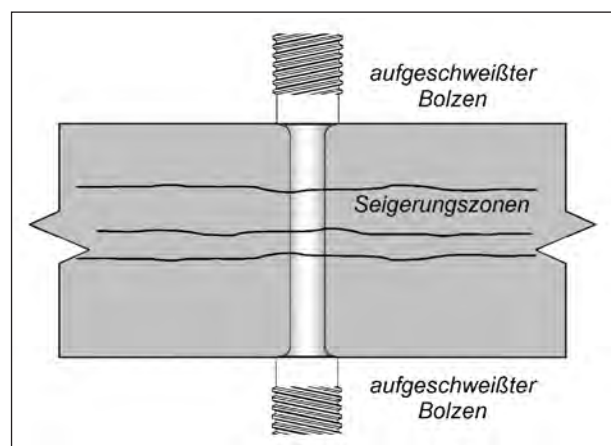


Bild 6-6: Rundprobe für Zugversuch (Beispiel)

## 6.6 Fertigungsbegleitende Qualitätsprüfung

### 6.6.1 Allgemeines

Für die Sicherstellung einer ausreichenden Qualität ist es wichtig, vom Konstruktionsstadium über die Werkstoffauswahl bis zur Herstellung und der nachfolgenden Prüfung Kontrollen vorzusehen [EN ISO 3834].

### 6.6.2 Fertigungskontrollen

Eine Kontrolle der Fertigung sollte kontinuierlich durch technische Abnahmen des Bauherrn erfolgen. Folgende Abnahmen sollten vorgenommen werden:

- a) Abnahme des Zuschnitts und der Schweißnahtvorbereitung,
- b) Abnahme nach abgeschlossener Vormontage der Rohrknoten (Kontrolle der Heftung, Kontrolle der Passgenauigkeit der anschließenden Rohre etc.),
- c) Kontrolle der Nacharbeiten bei Passungenauigkeiten,
- d) Abnahme der Schweißnähte entsprechend den Angaben des Schweißfachingenieurs.

### 6.6.3 Zerstörungsfreie Prüfungen

Als zerstörungsfreie Prüfmethode im Bereich des Knotens kommt neben der üblichen Sichtprüfung in der Regel nur die Ultraschall-Prüfung in Frage. Die Durchstrahlverfahren scheiden aufgrund der von innen unzugänglichen Knoten und wegen der relativ großen Wanddicken ( $t > 20$  mm) im Allgemeinen aus.

Mit der Arbeitsprobe gemäß Kapitel 6.2.2 sollte auch der später am Bauwerk zu prüfende Bereich festgelegt werden.

Der Sachverständige, der die Arbeitsprobe prüft, sollte auch die Prüfungen am Bauwerk vornehmen.

## 7 Ausblick

Im Rahmen dieses Forschungsvorhabens wurde der geschweißte KK-Knoten mit brückenbautypischer Geometrie einer ganzheitlichen Betrachtung mit Blick auf Materialermüdung unterzogen. Es

wurden Entwurfs-, Bemessungs- und Ausführungsempfehlungen entwickelt. Der Schwerpunkt des Forschungsvorhabens lag hierbei auf der Bereitstellung von SCF-Werten.

Für die Tragwerksplanung und die Bauaufsichtsbehörden soll an dieser Stelle der Stand der Technik mit Blick auf die Realisierbarkeit geschweißter Hohlprofilkonstruktionen mit KK-Knoten im Straßenbrückenbau zusammengefasst werden:

Die statische Auslegung der KK-Knoten ist durch [DIN EN 1993-1-1:2005-07] und [DIN EN 1993-1-8:2005-07] abgedeckt. Diese Normen existieren bereits im Weißdruck und sollen planmäßig bis 2010 bauaufsichtlich eingeführt werden.

Die ermüdungsgerechte Auslegung der KK-Knoten bedarf einer differenzierten Betrachtung von Einwirkungs- und Widerstandsseite. Die Einwirkungsseite des Ermüdungsnachweises der KK-Knoten auf der Basis des Strukturspannungskonzeptes wird durch die in diesem Forschungsvorhaben entwickelten SCF-Werte eindeutig beschrieben. Für den Ansatz der Ermüdungswiderstände werden die Angaben nach [ZHAO et al. 2002] empfohlen. Da es sich hierbei um keine durch eine Norm geregelten Werte handelt, ist die verantwortliche Bauaufsichtsbehörde rechtzeitig einzubinden. Es wäre wünschenswert, hierzu gezielt experimentelle Untersuchungen durchzuführen, um die Widerstandsseite genauer zu spezifizieren.

Die Anwendung einer Schweißnahtnachbehandlung ist sinnvoll, da die kritischen Stellen leicht erreichbar sind und auch schon erste positive Ergebnisse vorliegen. Zur Quantifizierung der Effekte sind aber noch weitere Forschungen erforderlich.

## 8 Literatur

### 8.1 Normen

ARS. Allgemeine Rundschreiben Straßenbau. Herausgeber: Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung. Verkehrsblatt-Sammlung Nr. S 1050

AWS 2004: Structural Welding Code – Steel, American Welding Society AWS D1.1/ D1.1M: 2004

- DIN 18808: 1984-10. Stahlbauten – Tragwerke aus Hohlprofilen unter vorwiegend ruhender Beanspruchung. Ausgabe Oktober 1984
- DIN EN 10025: 2004. Warmgewalzte Erzeugnisse aus Baustählen
- DIN EN 10025-1: 2004. Warmgewalzte Erzeugnisse aus Baustählen. Teil 1: Allgemeine technische Lieferbedingungen, Ausgabe: 2004
- DIN EN 10164: 2005-03. Stahlerzeugnisse mit verbesserten Verformungseigenschaften senkrecht zu Erzeugnisoberfläche – Technische Lieferbedingungen
- DIN EN 10204: 2005-01. Metallische Erzeugnisse – Arten von Prüfbescheinigungen
- DIN EN 10210: 2006. Warmgefertigte Hohlprofile für den Stahlbau aus unlegierten Baustählen und aus Feinkornbaustählen – Teil 1: Technische Lieferbedingungen
- DIN EN 10219: 2006. Kaltgefertigte geschweißte Hohlprofile für den Stahlbau aus unlegierten Baustählen und aus Feinkornbaustählen – Teil 1: Technische Lieferbedingungen; Deutsche Fassung EN 10219-1:2006
- DIN EN 1090-2: 2005. Ausführung von Stahltragwerken und Aluminiumtragwerken – Teil 2: Technische Anforderungen an die Ausführung von Tragwerken aus Stahl; Deutsche Fassung pr EN 1090-2:2005 (Entwurf)
- DIN EN 1714: 2007-08. Zerstörungsfreie Prüfung von Schweißverbindungen – Ultraschallprüfung von Schweißverbindungen. Entwurf
- DIN EN 1993-1-1: 2005-07. Eurocode 3: Bemessung und Konstruktion von Stahlbauten – Teil 1-1: Allgemeine Bemessungsregeln und Regeln für den Hochbau; Deutsche Fassung EN 1993-1-1:2005
- DIN EN 1993-1-10: 2005-07. Eurocode 3: Bemessung und Konstruktion von Stahlbauten – Teil 1-10: Stahlsortenwahl im Hinblick auf Bruchzähigkeit und Eigenschaften in Dickenrichtung
- DIN EN 1993-1-8: 2005-07. Eurocode 3: Bemessung und Konstruktion von Stahlbauten – Teil 1-8: Bemessung von Anschlüssen; Deutsche Fassung EN 1993-1-8:2005
- DIN EN 1993-1-9: 2005-07. Eurocode 3: Bemessung und Konstruktion von Stahlbauten, Teil 1-9: Ermüdung; Deutsche Fassung EN 1993-1-9:2005
- DIN EN 287-1: 2006-06. Prüfung von Schweißern – Schmelzschiweißen – Teil 1: Stähle
- DIN EN ISO 15609-1: 2005-01. Anforderung und Qualifizierung von Schweißverfahren für metallische Wertstoffe – Schweißanweisung – Teil 1: Lichtbogenschweißen
- DIN EN ISO 15613: 2004-09. Anforderung und Qualifizierung von Schweißverfahren für metallische Wertstoffe – Qualifizierung aufgrund einer vorgezogenen Arbeitsprüfung
- DIN EN ISO 15614-1: 2004-11. Anforderung und Qualifizierung von Schweißverfahren für metallische Wertstoffe – Schweißverfahrensprüfung – Teil 1: Lichtbogen- und Gasschiweißen von Stählen und Lichtbogenschweißen von Nickel und Nickelverbindungen
- DIN EN ISO 5817: 2006-10. Schweißen – Schmelzschiweißverbindungen an Stahl, Nickel, Titan und deren Legierungen (ohne Strahlschiweißen) – Bewertungsgruppen von Unregelmäßigkeiten
- DIN-Fachbericht 103: 2003. Bemessung von Stahlbrücken. DIN, Beuth-Verlag, Mai 2003
- DIN V ENV 1991-3: 1996-08. Grundlagen der Tragwerksplanung und Einwirkungen auf Tragbauwerke, Teil 3: Verkehrslasten auf Brücken, Deutsche Fassung ENV 1993-3, Ausgabe: 1996-08
- DIN V ENV 1993-1-1: 1992. Eurocode 3: Bemessung und Konstruktion von Stahlbauten – Teil 1-1: Allgemeine Bemessungsregeln, Bemessungsregeln für den Hochbau; Deutsche Fassung ENV 1993-1-1:1992
- DS 804: 2000. Vorschrift für Eisenbahnbrücken und sonstige Ingenieurbauwerke. Deutsche Bahn Gruppe, Bekanntgabe B6, September 2000.
- DVS 1702: 2003-05. Verfahrensprüfung im konstruktiven Ingenieurbau
- DVS 1704: 2004-05. Voraussetzungen und Verfahren für die Erteilung von Bescheinigungen über die Herstellerqualifikation zum Schweißen von Stahlbauten nach DIN 18800-7:2002-09
- EN 287-1: 2004-03+A2:2006-03. Prüfung von Schweißern – Schmelzschiweißen – Teil 1: Stähle
- EN 970: 1997-03. Zerstörungsfreie Prüfung von Schmelzschiweißnähten – Sichtprüfung

- EN 1435: 1997+A1:2002. Zerstörungsfreie Prüfung von Schweißnähten – Durchstrahlprüfung von Schmelzschweißverbindungen
- EN ISO 3834-1: 2006-03. Qualitätsanforderungen für das Schmelzschweißen von metallischen Werkstoffen – Teil 1: Kriterien für die Auswahl der geeigneten Stufe der Qualitätsanforderungen (ISO 3834-1:2005)
- Germanischer Lloyd II: 2005. Teil II: Werkstoffe, Ausgabe 2005
- Germanischer Lloyd IV: 2005. Rules and Guidelines – IV Industrial Services – 2 Guideline for the Certification of Offshore Wind Turbines. Edition 2005
- ZTV-ING. Zusätzliche technische Vertragsbedingungen und Richtlinien für Ingenieurbauten. Herausgeber: Bundesanstalt für Straßenwesen. Verkehrsblatt-Sammlung Nr. S 1056
- 8.2 Bücher, Beiträge etc.**
- ANSYS. Release 10,0 Documentation for Ansys
- ARMISÉN, J. M.: New Proposals in Steel Bridges and Footbridges. In: Proceedings of the 5<sup>th</sup> International Symposium on Steel Bridges, Barcelona, Spain, 5-7 March 2003, ECCS, No. 117, 2003, pp. 299-315
- BERNHARDT, K., MOHR, B., SEIFRIED, G., ANGELMAIER, V.: Talbrücke Korntal-Münchingen – innovativer Brückenentwurf als Rohrfachwerk-Verbundbrücke/Teil 1 – Entwurf. Stahlbau 72 (2003), Heft 2, S. 61-70
- DALLY, J. W., RILLEY, W. F.: Experimental Stress Analysis. McGraw-Hill, 3. Auflage, 1991.
- DAUNER, H.-G., DECORGES, G., ORIBASI, A., WÉRY, D. 1998: The Lully Viaduct, a composite bridge with steel tube truss. Journal of Constructional Steel Research, Vol. 46, No. 1-3, Paper No. 55, Elsevier Science Ltd., Oxford, U. K.
- DAUNER, H.-G.: Der Viadukt von Lully. Eine Neuheit im Verbundbrückenbau. Stahlbau 67 (1998), Heft 1, S. 1-14
- DENZER, G., WEYER, U., DIECKMANN, C.: Die Talbrücke St. Kilian – Entwurf und Ausführung. In: Stahlbau 75 (2006), Heft 2, S. 105-116
- DUTTA, D., WARDENIER, J., YEOMANS, N., SAKAE, K., BUCAK, Ö., PACKER, J. A.: Design Guide for fabrication, assembly and erection of hollow section structures. CIDECT Design Guide 7, TÜV-Verlag GmbH, Köln, 1998
- DUTTA, D.: Hohlprofil-Konstruktionen. Ernst & Sohn, Berlin, 1999
- Forschungsprojekt P 591: Wirtschaftliches Bauen von Straßen- und Eisenbahnbrücken aus Stahlhohlprofilen. Forschungsprojekt der Studiengesellschaft Stahlanwendung e. V., Laufzeit von 2003 bis 2006
- GLIJNIS, P. C., CROMMENTUYN, J.: To cast or not to cast, In: JAURRIETA, ALONSO & CHICA (Eds.), Tubular Structures IX, Proceedings of the 10<sup>th</sup> International Symposium on Tubular Structures, 18-20 Sept., Madrid, Spain, Swets & Zeitlinger, Lisse, 2003, pp. 129-134
- GSI, 2005: Lehrunterlagen zur Schweißfachingenieurausbildung der Gesellschaft für Schweißtechnik Internation mbH, DVS-Verlag 2005
- GÜNTHER, H.-P.: Ermüdungsverhalten von Stahlträgern mit schlanken Stegblechen im Brückenbau. Universität Stuttgart, Mitteilungen des Instituts für Konstruktion und Entwurf, Nr. 2002-1, Dissertation, Februar 2002
- HAAGENSEN, P. J., MADDOX, S. J., 2006: IIW Recommendations on Post Weld Improvement of Steel and Aluminium Structures, IIW Document XIII-1815-00
- HAIBACH, E.: Betriebsfestigkeit – Verfahren und Daten zur Bauteilberechnung. VDI-Verlag GmbH, Düsseldorf 1989
- HERION, S.: Guss im Bauwesen. In: Stahlbaukalendar 2007, S. 417-454
- HERION, S., MANG, F., PUTHLI, R.: Parametric Study on multiplanar K-joints with gap made of circular hollow sections by means of the finite element method. Proceedings of the 6<sup>th</sup> International Offshore and Polar Engineering Conference (1996). Los Angeles, USA, May 2 6-31, 1996, vol. IV, p. 68-73
- HERION, S., PUTHLI, R.: Brücken aus Stahlhohlprofilen – aktuelle Entwicklungen. In: Tagungsband 744 zum 2. Stahl-Symposium Werkstoffe, Anwendung, Forschung, 19. März 2002, Aachen, Düsseldorf: Verlags- und Vertriebsgesellschaft mbH, 2002

- HERION, S., WEYNAND, K.: Ermüdungsgerechte Bemessung von Hohlprofilknoten nach dem CIDECT Fatigue Design Guide. Stahlbau 69 (2000), Heft 4, S. 276-282
- HERRMANN, M.: Untersuchungen zur Betriebsfestigkeit von Hohlprofilknoten im Eisenbahnbrückenbau. Universität Stuttgart, Institut für Konstruktion und Entwurf, Diplomarbeit, Mai 2007 (Nr. 2007-24x)
- HOBBACHER, A.: Recommendations for fatigue design of welded joints and components. International Institute of Welding (IIW), Document XIII-1965-03/XV 1127-03
- KARAMANOS, S. A., ROMEJIN, A., WARDENIER, J.: Stress concentrations and joint flexibility effects in multi-planar welded tubular connections for fatigue design. Research Report Delft 1997
- KARPA, M., CASPER, H.-J.: Rohrfachwerkbrücke als Rahmen in Verbundbauweise im Zuge der BAB A 73 Suhl – Lichtenfels, Beitrag der Fa. Sophistik
- KUHLMANN, U., EULER, M.: Entwicklung von SCF-Werten für KK-Knoten im Straßenbrückenbau. Dokumentation zu BAST-Forschungsvorhaben 15.413/2005/CRB: Entwurfs-, Bemessungs- und Konstruktionsempfehlungen für geschweißte Hohlprofilverbindungen mit KK-Knoten im Straßenbrückenbau, Institut für Konstruktion und Entwurf, 2008, Nr. 2008-44X
- KUHLMANN, U., GÜNTHER, H.-P., SAUL, R., HÄDERLE, M.-U., STUBA, G.: Zur Anwendung geschweißter Hohlprofilkonstruktionen im Brückenbau. Stahlbau 71 (2002), Heft 7, S. 507-515
- KUHLMANN, U., PELKE, E., HAUF, G., HERRMANN, T., STEINER, J., AUL, M.: Ganzheitliche Wirtschaftlichkeitsbetrachtungen bei Verbundbrücken unter Berücksichtigung des Bauverfahrens und der Nutzungsdauer. In: Stahlbau 76 (2007), Heft 2, S. 105-116
- MANG, F., BUCAK, Ö., 1996: Hohlprofilkonstruktionen, Stahlbau-Handbuch, Teil I A, Stahlbauverlag, Köln 1993
- NAUMANN, J.: Brückenbau in Deutschland. In: GRAUBNER, C.-A., GARG, A. (Hrsg.), Internationales Brückenbausymposium, Tagungsband, 1.-2. Oktober, Darmstadt, TU Darmstadt, FG Massivbau
- NIEMI, E.: Stress Determination for Fatigue Analysis of Welded Structures. IIS/IIW-1221-93, Abington Publishing, Cambridge, 1995
- NUSSBAUMER, A., BORGES, L.: Experimental determination of stress intensity factors on large-scale tubular trusses fatigue tests. 12<sup>th</sup> International Symposium on Tubular Structures, Shanghai, China, 2008
- PUTHLI, R.: Hohlprofilkonstruktionen aus Stahl nach DIN V ENV 1993 (EC 3) und DIN 18800 (11.90). Werner Verlag 1, Auflage 1998
- RADAJ, D.: Ermüdungsfestigkeit – Grundlagen für Leichtbau, Maschinen- und Stahlbau. Springer-Verlag Berlin, Heidelberg 2003
- RADAJ, D., SONSINO, C. M.: Ermüdungsfestigkeit von Schweißverbindungen nach lokalen Konzepten. Verlag für Schweißen und verwandte Verfahren, DVS-Verlag, Düsseldorf, 2000. Fachbuchreihe Schweißtechnik, Band 142
- ROMEIJN, A.: Stress and strain concentration factors of welded multiplanar tubular joints, PhD Thesis, Delft, The Netherlands, 1994
- SCHLAICH, J., SCHOBER, H., 1999a: Rohrknoten aus Stahlguss. In: Stahlbau 8 (1999), S. 625-665
- SCHLAICH, J., SCHOBER, H., 1999b: Bahnbrücke am Lehrter Bahnhof in Berlin – Die Humboldthafenbrücke. In: Stahlbau 68 (1999), Heft 6, S. 448-456
- SCHLAICH, J., SCHOBER, H.: Rohrknoten aus Stahlguss In: Stahlbau 68 (1999), Heft 8, S. 734-752, Fortsetzung in Heft 8, S. 625-665
- SCHLAICH, J., PÖTZL, M., BEICHE, H., EHRKE, E., DECKER, U.: Die Brücken über das Nesembachtal im Zuge der Ostumfahrung Stuttgart-Vaihingen. Beton- und Stahlbetonbau 95, (2000), Heft 11, S. 678-687
- SCHUMACHER, A.: Fatigue Behaviour of Welded Circular Hollow Section Joints in Bridges. Dissertation, Thèse 2727, EPFL, Lausanne, 2003
- SCHUMACHER, A., NUSSBAUMER, A., HIRT, M. A.: Fatigue Behaviour of Welded Circular Hollow Section (CHS) Joints in Bridges. In: PUTHLI, R., HERION, S. (Eds.), Tubular Structures IX,

- Proceedings of the 9<sup>th</sup> International Symposium on Tubular Structures, 3-5 April, Düsseldorf, Germany, Swets & Zeitlinger, Lisse, 2001, pp. 291-297
- SEDLACEK, G.: Anschlüsse von Brückenhängern, Deutscher Stahlbauverband, FG Brückenbau, Düsseldorf, 2003
- SEEGER, T.: Grundlagen für Betriebsfestigkeitsnachweise. Stahlbau-Handbuch, Bd. 1, Teil B, Stahlbau-Verlagsgesellschaft, Köln 1996, S. 5-123
- SEIFRIED, G., ANGELMAIER, V., WILHELM, G., BESCHORNER, K.: Eisenbahnbrücke über den Humboldthafen in Berlin. In: Stahlbau 68 (1999), Heft 7, S. 511-519
- STUBA, G.: Zur Anwendung geschweißter Hohlprofilknoten im Brückenbau. Universität Stuttgart, Institut für Konstruktion und Entwurf, Diplomarbeit, September 2001 (Nr. 2001-34x)
- van WINGERDE, A. M., PACKER, J. A., WARDENIER, J.: Simplified SCF formulae and graphs for CHS and RHS K- and KK-connections. In: Journal of Constructional Steel Research 57 (2001), S. 221-252
- van WINGERDE, A. M., WARDENIER, J., PACKER, J. A., 1998: Simplified design graphs for the fatigue design of multiplanar K-joints with gap. CIDECT report 7R-23/98
- WALBRIDGE, S.: A probabilistic study of fatigue in post-weld treated tubular bridge structures. Dissertation, Thèse 3330, EPFL, Lausanne, 2005
- WARDENIER, J., KUROBANE, Y., PACKER, J. A., DUTTA, D., YEOMANS, N. F.: Berechnung und Bemessung von Verbindungen aus Rundhohlprofilen unter vorwiegend ruhender Beanspruchung. CIDECT (Hrsg.), Konstruieren mit Stahlhohlprofilen, Verlag TÜV Rheinland, 1991
- WARDENIER, J.: Hollow Section Joints. Delft University Press 1982
- ZHAO, X.-L., HERION, S., PACKER, J. A., PUTHLI, R. S., SEDLACEK, G., WARDENIER, J., WEYNAND, K., van WINGERDE, A. M., YEOMANS, N. F.: Geschweißte Anschlüsse von runden und rechteckigen Hohlprofilen unter Ermüdungsbelastung. CIDECT Design Guide 8, TÜV-Verlag GmbH, Köln, 2002
- ZIRN, R.: Schwingfestigkeitsverhalten geschweißter Rohrknotenpunkte und Rohrlaschenverbindungen. Dissertation, MPA Stuttgart, 1975

### 8.3 Sonstige Veröffentlichungen

Vallourec & Mannesmann: Firmenbroschüre „Werk Düsseldorf-Reisholz“, Düsseldorf, 1999

## Schriftenreihe

### Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen

#### Unterreihe „Brücken- und Ingenieurbau“

#### 1995

- B 6: Zur Berechnung von Platten mit schwacher Querbewehrung  
Kaschner € 11,50
- B 7: Erprobung von dichten lärmindernden Fahrbahnbelägen für Brücken  
Sczyslo € 12,50
- B 8: Untersuchungen am Brückenbelag einer orthotropen Fahrbahnplatte  
Krieger, Rath € 17,50
- B 9: Anwendung von zerstörungsfreien Prüfmethode bei Betonbrücken  
Krieger € 13,00
- B 10: Langzeituntersuchungen von Hydrophobierungsmitteln  
Maaß, Krieger € 12,50

#### 1996

- B 11: Fahrbahnbeläge auf Sohlen von Trogbauwerken  
Wruck € 12,00
- B 12: Temperaturmessungen bei der Verbreiterung der Rodenkirchener Brücke  
Goebel € 15,50
- B 13: Strukturanalyse von Beton  
Gatz, Gusia € 11,00

#### 1997

- B 14: Verhalten von Fahrbahnübergängen aus Asphalt infolge Horizontallasten  
Krieger, Rath € 16,00
- B 15: Temperaturbeanspruchung im Beton und Betonerersatz beim Einbau von Abdichtungen  
Großmann, Budnik, Maaß € 14,50
- B 16: Seilverfüllmittel – Mechanische Randbedingungen für Brückenseile  
Eilers, Hemmert-Halswick € 27,50
- B 17: Bohrverfahren zur Bestimmung der Karbonatisierungstiefe und des Chloridgehaltes von Beton  
Gatz, Gusia, Kuhl € 14,00

#### 1998

- B 18: Erprobung und Bewertung zerstörungsfreier Prüfmethode für Betonbrücken  
Krieger, Krause, Wiggerhauser € 16,50
- B 19: Untersuchung von unbelasteten und künstlich belasteten Beschichtungen  
Schröder € 11,00
- B 20: Reaktionsharzgebundene Dünnbeläge auf Stahl  
Eilers, Ritter € 12,50
- B 21: Windlasten für Brücken nach ENV 1991-3  
Krieger € 10,50

#### 1999

- B 22: Algorithmen zur Zustandsbewertung von Ingenieurbauwerken  
Haardt € 11,50

- B 23: Bewertung und Oberflächenvorbereitung schwieriger Untergründe  
Schröder, Sczyslo € 11,00
- B 24: Erarbeitung einer ZTV für reaktionsharzgebundene Dünnbeläge auf Stahl  
Eilers, Stoll € 11,00
- B 25: Konzeption eines Managementsystems zur Erhaltung von Brücken- und Ingenieurbauwerken  
Haardt € 12,50
- B 26: Einsatzmöglichkeiten von Kletterrobotern bei der Bauwerksprüfung  
Krieger, Rath, Berthold € 10,50
- B 27: Dynamische Untersuchungen an reaktionsharzgebundenen Dünnbelägen  
Eilers, Ritter, Stoll € 11,00

#### 2000

- B 28: Erfassung und Bewertung von reaktionsharzgebundenen Dünnbelägen auf Stahl  
Eilers € 11,00
- B 29: Ergänzende Untersuchungen zur Bestimmung der Karbonatisierungstiefe und des Chloridgehaltes von Beton  
Gatz, Quaas € 12,00
- B 30: Materialkonzepte, Herstellungs- und Prüfverfahren für elutionsarme Spritzbetone  
Heimbecher € 11,00
- B 31: Verträglichkeit von reaktionsharzgebundenen Dünnbelägen mit Abdichtungssystemen nach den ZTV-BEL-ST  
Eilers, Stoll € 10,50
- B 32: Das Programm ISOCORRAG: Ermittlung von Korrosivitätskategorien aus Massenverlusten  
Schröder € 11,50
- B 33: Bewehrung von Belägen auf Stahlbrücken mit orthotropen Fahrbahnplatten  
Eilers, Sczyslo € 17,00
- B 34: Neue reaktionsharzgebundene Dünnbeläge als Fahrbahnbeläge auf einem D-Brücken-Gerät  
Eilers, Ritter € 13,00

#### 2001

- B 35: Bewehrung von Brückenbelägen auf Betonbauwerken  
Wruck € 11,50
- B 36: Fahrbahnübergänge aus Asphalt  
Wruck € 11,00
- B 37: Messung der Hydrophobierungsqualität  
Hörner, von Witzhausen, Gatz € 11,00
- B 38: Materialtechnische Untersuchungen beim Abbruch der Talbrücke Haiger  
Krause, Wiggerhauser, Krieger € 17,00
- B 39: Bewegungen von Randfugen auf Brücken  
Eilers, Wruck, Quaas € 13,00

#### 2003

- B 40: Schutzmaßnahmen gegen Graffiti von Weschpfennig € 11,50
- B 41: Temperaturmessung an der Unterseite orthotroper Fahrbahnplatten beim Einbau der Gussasphalt-Schutzschicht  
Eilers, Kuchler, Quaas € 12,50
- B 42: Anwendung des Teilsicherheitskonzeptes im Tunnelbau  
Städling, Krocker € 12,00
- B 43: Entwicklung eines Bauwerks Management-Systems für das deutsche Fernstraßennetz – Stufen 1 und 2  
Haardt € 13,50
- B 44: Untersuchungen an Fahrbahnübergängen zur Lärminderung  
Hemmert-Halswick, Ullrich € 12,50



- B 45: Erfahrungssammlungen:  
**Stahlbrücken – Schäden – wetterfeste Stähle Seile**  
 Teil 1: Dokumentation über Schäden an Stahlbrücken  
 Teil 2: Dokumentation und Erfahrungssammlung mit Brücken aus wetterfesten Stählen  
 Teil 3: Erfahrungssammlung über die Dauerhaftigkeit von Brückenseilen und -kabeln  
 Hemmert-Halswick € 13,00

## 2004

- B 46: Einsatzbereiche endgültiger Spritzbetonkonstruktionen im Tunnelbau  
 Heimbecher, Decker, Faust € 12,50

## 2005

- B 47: Gussasphaltbeläge auf Stahlbrücken  
 Steinauer, Scharnigg € 13,50

## 2006

- B 48: Scannende Verfahren der zerstörungsfreien Prüfung von Brückenbauwerken  
 Holst, Streicher, Gardei, Kohl, Wöstmann, Wiggenghauser € 15,00  
 B 49: Einfluss der Betonoberflächenvorbereitung auf die Haftung von Epoxidharz  
 Raupach, Rößler € 13,50  
 B 50: Entwicklung eines Bauwerks-Management-Systems für das deutsche Fernstraßennetz, Stufe 3  
 Holst € 13,50  
 B 51: Hydrophobierungsqualität von flüssigen und pastösen Hydrophobierungsmitteln  
 Panzer, Hörner, Kropf € 12,50  
 B 52: Brückenseile mit Galfan-Überzug – Untersuchung der Haftfestigkeit von Grundbeschichtungen  
 Friedrich, Staeck € 14,50  
 B 53: Verwendung von selbstverdichtendem Beton (SVB) im Brücken- und Ingenieurbau an Bundesfernstraßen  
 Tauscher € 14,50  
 B 54: Nachweis des Erfolges von Injektionsmaßnahmen zur Mängelbeseitigung bei Minderdicken von Tunnelinnenschalen  
 Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann kostenpflichtig unter [www.nw-verlag.de](http://www.nw-verlag.de) heruntergeladen werden.  
 Rath, Berthold, Lähner € 12,50

## 2007

- B 55: Überprüfung des Georadarverfahrens in Kombination mit magnetischen Verfahren zur Zustandsbewertung von Brückenfahrbahnplatten aus Beton mit Belagsaufbau  
 Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann kostenpflichtig unter [www.nw-verlag.de](http://www.nw-verlag.de) heruntergeladen werden.  
 Krause, Rath, Sawade, Dumat € 14,50  
 B 56: Entwicklung eines Prüfverfahrens für Beton in der Expositions-kategorie XF2  
 Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann kostenpflichtig unter [www.nw-verlag.de](http://www.nw-verlag.de) heruntergeladen werden.  
 Setzer, Keck, Palecki, Schießl, Brandes € 19,50  
 B 57: Brandversuche in Straßentunneln – Vereinheitlichung der Durchführung und Auswertung  
 Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann kostenpflichtig unter [www.nw-verlag.de](http://www.nw-verlag.de) heruntergeladen werden.  
 Steinauer, Mayer, Kündig € 26,50  
 B 58: Quantitative Risikoanalysen für Straßentunnel  
 Sistenich € 14,50

## 2008

- B 59: Bandverzinkte Schutzplankenholme  
 Schröder € 12,50

- B 60: Instandhaltung des Korrosionsschutzes durch Teilerneuerung - Bewehrung  
 Schröder € 13,50  
 B 61: Untersuchung von Korrosion an Fußplatten von Schutzplankenpfosten  
 Schröder, Staeck € 13,00  
 B 62: Bewährungsnachweis von Fugenfüllungen ohne Unterfüllstoff  
 Eilers € 12,00  
 B 63: Selbstverdichtender Beton (SVB) im Straßentunnelbau  
 Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann kostenpflichtig unter [www.nw-verlag.de](http://www.nw-verlag.de) heruntergeladen werden.  
 Heunisch, Hoepfner, Pierson (†), Dehn, Orgass, Sint € 17,50  
 B 64: Tiefenabhängige Feuchte- und Temperaturmessung an einer Brückenkappe der Expositions-kategorie XF4  
 Brameshuber, Spörel, Warkus € 12,50

## 2009

- B 65: Zerstörungsfreie Untersuchungen am Brückenbauwerk A1 Hagen/Schwerte  
 Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann kostenpflichtig unter [www.nw-verlag.de](http://www.nw-verlag.de) heruntergeladen werden.  
 Friese, Taffe, Wöstmann, Zoega € 14,50  
 B 66: Bewertung der Sicherheit von Straßentunneln  
 Zulauf, Locher, Steinauer, Mayer, Zimmermann, Baltzer, Riepe, Kündig € 14,00  
 B 67: Brandkurven für den baulichen Brandschutz von Straßentunneln  
 Blossfeld € 17,50  
 B 68: Auswirkungen des Schwerlastverkehrs auf die Brücken der Bundesfernstraßen – Teile 1-4  
 Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann kostenpflichtig unter [www.nw-verlag.de](http://www.nw-verlag.de) heruntergeladen werden.  
 Kaschner, Buschmeyer, Schnellenbach-Held, Lubasch, Grünberg, Hansen, Liebig, Geißler € 29,50  
 B 69: Berücksichtigung der Belange behinderter Personen bei Ausstattung und Betrieb von Straßentunneln  
 Wagener, Grossmann, Hintzke, Sieger € 18,50  
 B 70: Frost-Tausalz-Widerstand von Beton in Brücken und Ingenieurbauwerken an Bundesfernstraßen  
 Tauscher € 14,50

## 2010

- B 71: Empfehlungen für geschweißte KK-Knoten im Straßentunnelbau  
 Kuhlmann, Euler € 22,50

Alle Berichte sind zu beziehen beim:

Wirtschaftsverlag NW  
 Verlag für neue Wissenschaft GmbH  
 Postfach 10 11 10  
 D-27511 Bremerhaven  
 Telefon: (04 71) 9 45 44 - 0  
 Telefax: (04 71) 9 45 44 77  
 Email: [vertrieb@nw-verlag.de](mailto:vertrieb@nw-verlag.de)  
 Internet: [www.nw-verlag.de](http://www.nw-verlag.de)

Dort ist auch ein Kompletverzeichnis erhältlich.