

Neue Verbindungen mit gezahnten Hochleistungs- Grenzflächen aus Stahl zur hocheffizienten und duktilen Kraftübertragung zwischen Fertigteilen aus HPC

vorgelegt von

M.Sc.

Jonas Schmidt

von der Fakultät VI - Planen Bauen Umwelt
der Technischen Universität Berlin
zur Erlangung des akademischen Grades
Doktor der Ingenieurwissenschaften
Dr.-Ing.

genehmigte Dissertation

Promotionsausschuss:

Vorsitzender: Prof. Dr.-Ing. Karsten Geißler

Gutachter: Prof. Dr.-Ing. Volker Schmid

Gutachter: Prof. Dr.-Ing. Holger Falter

Tag der wissenschaftlichen Aussprache: 01.08.2019

Berlin 2019

Vorwort

Die vorliegende Dissertation entstand aus dem Wunsch, mein ingenieurtechnisches Wissen stetig weiterzuentwickeln und im Rahmen eines Forschungsprojektes an der Hochschule Coburg in Kooperation mit der TU Berlin wichtige Erfahrungen zu sammeln.

In dieser Arbeit wird eine modulare Verbindung für den Stahlbetonfertigteilbau entworfen, die große Kräfte übertragen kann und ein robustes und duktileres Verhalten aufweist. In umfangreichen Versuchsdurchführungen wird die Verbindung entwickelt und ein Bemessungskonzept erarbeitet. Die Arbeit soll auch dazu beitragen, das Potential von modularen Konstruktionen aufzuzeigen.

Um diese Arbeit erfolgreich umsetzen zu können, waren viele Personen beteiligt, denen ich herzlich danken möchte.

Mein Mentor, Herr Michael Knörnschild, hat das Projekt von Anfang an unterstützt. Durch großen Einsatz hat er geholfen finanzielle Mittel für ein derartiges Vorhaben zu aktivieren. Ich danke ihm für sein Vertrauen, das ich seit dem ersten Tag in seinem Ingenieurbüro genießen durfte.

Im Studiengang Bauingenieurwesen der Hochschule Coburg wurde durch dieses Projekt in gewisser Weise „Neuland“ begangen. Dass das möglich war, habe ich auch dem Einsatz von Herrn Prof. Dr.-Ing. Michael Pötzl † zu verdanken. Herzlichen Dank dafür.

Meinem akademischen Lehrer Herrn Prof. Dr.-Ing. Holger Falter danke ich für das entgegengebrachte Vertrauen, der Bereitschaft und dem Mut dieses Projekt anzugehen und der Möglichkeit zu einer selbstständigen und eigenverantwortlichen Forschungstätigkeit. Viele intensive und konstruktive Gespräche haben mich bei der Bearbeitung bestärkt und entscheidend vorangebracht. Außerdem habe ich über die Forschungstätigkeit hinaus in vielerlei Hinsicht sehr viel lernen können. Herzlichen Dank.

Meinem Doktorvater, Herrn Prof. Dr.-Ing. Volker Schmid möchte ich für das Interesse an der Arbeit, die vielen wichtigen sowie kreativen Gespräche und das entgegengebrachte Vertrauen bedanken. Desweiteren möchte ich mich für die Übernahme des Hauptberichts bedanken.

Den Professoren und Kollegen der Studiengänge Bauingenieurwesen und Architektur an der Hochschule Coburg möchte ich für die gute Zusammenarbeit bei der gemeinsamen Betreuung interdisziplinärer Projekte bedanken. Dadurch wurde mein Erfahrungsschatz ungemein erweitert. Den Professoren des Studiengangs Maschinenbau möchte ich für die interessanten und wertvollen Gespräche zum Thema „Stahlverzahnungen“ bedanken. Allen voran Frau Prof. Dr.-Ing. Gundi Baumeister, deren Labor ich nutzen durfte, und Herrn Prof. Dr.-Ing. Kai Hiltmann sowie Herrn Dipl.-Ing. Gerhard Kraus.

Für die administrative Unterstützung gilt mein herzlicher Dank Frau Ines Brauer und Frau Christin Senske. Bei Frau Dr. Regina Graßmann möchte ich mich für die Durchsicht der Arbeit bedanken.

Meinem Kollegen Tobias Nettekoven danke ich für die fruchtbare freundschaftliche Zusammenarbeit im gemeinsamen Forschungsprojekt, sowie für die tolle Zeit während der umfangreichen Versuche und die wertvollen Diskussionen. Bei Andreas Reimer, Stephan Arendt, Stefan Behring und Peter Lenke bedanke ich mich für die Unterstützung und den fachlichen Austausch am Fachgebiet Verbundstrukturen der TU Berlin.

Ebenfalls gilt mein Dank allen studentischen Mitarbeitern und Bearbeiter/innen von Abschlussarbeiten im Forschungsprojekt „Modularer Fachwerkträger“. In alphabetischer Reihenfolge: Peter Biadatz, Anna Glotz, Kai Hofmann, Sebastian Kießling, Theresa Körber, Robert Kull, Zhanghangzhi Luo, Philipp Müller, Björn Oertel, Ralf Pechtold, Hannes Riedelbauch, Frederik Schauburger, Christoph Schubert, Maximilian Schubert, Rafael Vogt, Lucas Vorderwülbecke, Sebastian Völkel, Christian Willacker, Sarah Wörner, Meiling Zheng.

Desweiteren möchte ich mich bei den Firmen Pfeifer Seil- und Hebeteknik (Memmingen), Benno Drössler (Siegen), Otto Quast (Freudenberg), Angermüller Bau (Untersiemau), Dechant Bau (Weismain), Dyckerhoff (Wiesbaden), Ingenieurgruppe Knörnschild (Coburg) und Tigges-Beton Ingenieur- und Sachverständigenbüro (Freudenberg) herzlich für die finanzielle und fachliche Unterstützung bedanken.

Für den interessanten und wichtigen fachlichen Austausch möchte ich mich bei Herrn Dr. Salam Al Sabah, Herrn Dr. Phuc Huynh und Herrn Dr. Linh Truonghong vom University College Dublin sowie Herrn Pat Dallard vom Büro Arup bedanken.

Ich möchte meinen Eltern, Brüdern, Großeltern und Schwiegereltern sowie Eli und Thomas für die Unterstützung auf meinem Lebensweg danken.

Mein ganz besonderer Dank gilt meiner Frau Julia sowie unseren drei wundervollen Kindern Johanna, Marie und David für die Unterstützung und Geduld sowie die Freude, die ich durch euch erfahre.

Coburg, im Frühjahr 2019

Jonas Schmidt

Inhaltsverzeichnis

Vorwort	III
Inhaltsverzeichnis	V
Kurzzusammenfassung	1
Abstract	2
1. Einleitung	3
1.1 Einordnung der Thematik und Motivation	3
1.2 Ziel der Arbeit und Lösungsweg	3
2. Entwurf eines neuen modularen Verbindungskonzeptes	7
2.1 Stand der Forschung und Technik zu modularen Konstruktionen im Betonfertigteilbau	7
2.1.1 Etablierte Systeme	7
2.1.2 Konsolen	7
2.1.3 Fachwerkknoten und weitere modulare Elemente	10
2.1.4 Zusammenfassung und Darstellung des Forschungsbedarfs zu modularen Verbindungen	11
2.2 Stand der Technik und Forschung zu Fügungsmethoden modularer Konstruktionen	12
2.2.1 Reibung	12
2.2.2 Betonverzahnung	12
2.2.3 Klebeverbindung	13
2.2.4 Dübelleisten und Betondübel	13
2.2.5 Implantate	14
2.2.6 Verzahnungen aus Stahl	14
2.3 Anforderungen an modulare Verbindungen	16
2.3.1 Studien zum Lastansatz	16
2.3.2 Technische und baubetriebliche Anforderungen	18
2.4 Toleranzbetrachtung modularer Verbindungen	18
2.4.1 Toleranzausgleich	18
2.4.2 Herstelltoleranzen von Stahlzähnen	19
2.5 Konzeptentwurf des Stahleinbauteils	22
2.5.1 Zahnleiste beidseitig in Ortbeton	22
2.5.2 Zahnleiste mit Vergussfuge	22
2.5.3 Zahnleiste mit feiner Stahlverzahnung	23
3. Entwicklung der Stahlzahngeometrie	24
3.1 Ziel und Vorgehensweise	24
3.2 Maschinenelemente als Grundlage für Stahlverzahnungen	24
3.3 Grundlagen zur Betrachtung von Singularitäten	26
3.4 Grundlegende Überlegungen zur Stahlzahngeometrie	28
3.5 Werkstoff und Werkstoffmodell Stahl	34

3.5.1 Materialkennwerte Stahl.....	34
3.5.2 Materialmodell Stahl	38
3.6 Simulationsgrundlagen.....	39
3.6.1 Finite Elemente.....	39
3.6.2 Finite Elemente Netz.....	40
3.6.3 Geometrische Nichtlinearität.....	40
3.7 Analytische Entwicklung der Stahlzahngeometrie.....	41
3.7.1 Abmessungen und Lagerung der Zahnleiste sowie Belastung	41
3.7.2 Aufbau der Studie mit FE-Berechnungen	42
3.7.3 Einfluss des Zahngrundradius	44
3.7.4 Spannungsverteilung in Abhängigkeit der Zahngeometrie bei Lagersituation 1	45
3.7.5 Spannungsverteilung in Abhängigkeit der Zahngeometrie bei Lagersituation 2	46
3.7.6 Numerische Betrachtung der Hertz`schen Pressungen.....	52
3.7.7 Zusammenfassung und Stahlzahngeometrie für die weitere Bearbeitung.....	54
3.8 Versuche an Stahlprismen mit gezahnter Kontaktfläche.....	54
3.8.1 Versuchsprogramm und Prüfkörper	54
3.8.2 Prüfmaschine und Messtechnik.....	57
3.8.3 Versuchsaufbau	58
3.8.4 Versuchsdurchführung	59
3.8.5 Versuchsbeobachtungen und Messergebnisse.....	59
3.9 Numerische Simulation an Stahlprismen mit gezahnter Kontaktfläche.....	64
3.9.1 Simulationsmodell und Belastung.....	64
3.9.2 Simulationsergebnisse	64
3.10 Zusammenfassung zur Stahlzahngeometrie	67
4. Duktile Verbindung von Betonbauteilen mit Zahnleisten aus Stahl	69
4.1 Ziel und Vorgehensweise	69
4.2 Werkstoff und Werkstoffmodell Beton	70
4.2.1 Materialkennwerte Beton	70
4.2.2 Materialmodell Beton.....	71
4.3 Versuche an Betonprismen mit Zahnleistenpaaren	73
4.3.1 Versuche.....	73
4.3.2 Versuchsergebnisse und Auswertung.....	75
4.4 Numerische Untersuchungen zur Stahlverzahnung an Betonprismen mit Zahnleistenpaaren	81
4.4.1 Simulationsmodell.....	81
4.4.2 Simulationsergebnisse	81
4.5 Zusammenfassung zur duktilen Verbindung.....	84

5. Einsatz der Zahnleiste im Stahlbeton-Fertigteilbau.....	85
5.1 Allgemeine Anwendungsmöglichkeiten	85
5.2 Anwendung Konsole	87
5.3 Anwendung Fachwerkknotenpunkt.....	89
5.4 Zusammenfassung zum Einsatz der Zahnleiste.....	91
6. Versuche und Simulation zu modularen Konsolen mit Zahnleisten aus Stahl.....	92
6.1 Versuche Konsole.....	92
6.1.1 Konzeption des Versuchsaufbau	92
6.1.2 Prüfprogramm zur Konsole	92
6.1.3 Prüfkörper.....	92
6.1.4 Prüfmaschine und Messtechnik	93
6.1.5 Versuchsaufbau	94
6.1.6 Versuchsdurchführung	95
6.1.7 Versuchsbeobachtungen und Messergebnisse.....	95
6.2 Simulation der Konsole	100
6.2.1 Simulationsmodell.....	100
6.2.2 Simulationsergebnisse	102
6.3 Zusammenfassung der Versuche und Simulationen zur Konsole	106
7. Versuche und Simulation zum modularen Fachwerkknoten mit Zahnleisten aus Stahl.....	108
7.1 Versuche zum Fachwerkknoten	108
7.1.1 Konzeption des Versuchsaufbau	108
7.1.2 Prüfprogramm zum Fachwerkknoten	108
7.1.3 Prüfkörper.....	108
7.1.4 Prüfmaschine und Messtechnik	108
7.1.5 Versuchsaufbau und Versuchsdurchführung.....	109
7.1.6 Versuchsbeobachtungen und Messergebnisse.....	110
7.2 Simulation zum Fachwerkknoten	113
7.2.1 Simulationsmodell.....	113
7.2.2 Simulationsergebnis	114
7.3 Zusammenfassung der Versuche und Simulationen zum Fachwerkknoten	115
8. Ingenieurmodell zum Tragverhalten der Stahlverzahnung	117
8.1 Numerische Parameterstudie zum Verhalten der Stahlverzahnung	118
8.1.1 Simulationsgrundlagen.....	118
8.1.2 Simulationsmodell und Belastung.....	119
8.1.3 Parameterstudie zu den Pressungen an der Zahnflanke.....	119
8.2 Interpretation und Darstellung des Kraftflusses in der Zahnleiste mit Hilfe von Stabwerkmodellen	120
8.2.1 Kraftfluss mit reibungsfreiem Kontakt.....	120

8.2.2 Kraftfluss bei reibungsbehaftetem Kontakt.....	128
8.3 Zahnbelastung über die Länge der Zahnleiste verteilt.....	130
8.3.1 Ansatz eines reibungsfreien Kontakt.....	130
8.3.2 Ansatz eines reibungsbehafteten Kontakt.....	132
8.4 Belastungsverteilung entlang der Zahnflanke	133
8.4.1 Belastungsverteilung entlang der Zahnflanke bei reibungsfreien Kontakt.....	133
8.4.2 Belastungen am Zahnkontakt bei reibungsbehafteten Kontakt	142
8.5 Spannungen am Zahn	143
8.6 Fazit zu den Pressungen an der Zahnflanke und den Spannungen im Zahn	146
8.7 Zusammenfassung.....	147
9. Bemessungsvorschlag für die neue Verbindung.....	148
9.1 Ziel und Vorgehensweise	148
9.2 Sicherheitskonzept und Materialgesetze	148
9.2.1 Grenzzustand der Tragfähigkeit	148
9.2.2 Grenzzustand der Gebrauchstauglichkeit	149
9.2.3 Materialgesetze.....	149
9.3 Bemessungsansatz für die feine Stahlverzahnung.....	151
9.3.1 Allgemeines.....	151
9.4 Bemessungsansatz für die Konsole	154
9.4.1 System und Konstruktion	154
9.4.2 Nachweisführung.....	155
9.5 Bemessungsansatz für den Fachwerkknoten.....	157
9.5.1 System und Konstruktion	157
9.5.2 Nachweisführung.....	157
9.6 Zusammenfassung.....	158
10. Zusammenfassung und Ausblick	158
Quellenverzeichnis.....	165
Eidesstattliche Versicherung	173
Lebenslauf	174

Anhang

Kurzzusammenfassung

Die neue Verbindung stellt eine Erweiterung der Verbindungsmöglichkeiten im Stahlbetonfertigteilbau dar. Die Notwendigkeit modulare Konstruktionen im Stahlbetonfertigteilbau effizient einzusetzen, zeigen nachfolgende Konstruktionen. Werden Fertigteile auf der Baustelle trocken miteinander gefügt, so sind insbesondere für Anschlüsse, die in einer Ebene erfolgen sollen, Ausklinkungen oder stahlbaumäßige Anschlüsse, notwendig. Das betrifft eine Vielzahl von Anschlusssituationen wie zum Beispiel Träger an Stütze oder Nebenträger an Hauptträger. Bei Konsolen ist es notwendig, die Standardschalung zu unterbrechen, um aufwendige Individualschalungen der Konsolen herzustellen. Auch große Konstruktionen, wie zum Beispiel ein Fachwerkträger, kann als Fertigteil nicht hergestellt werden, sondern muss monolithisch vor Ort betoniert werden. Um Stahlbetonbauteile modular zu fügen, wird die neue Verbindung entwickelt.

Funktion

Die neue Verbindung besteht aus zwei gezahnten Stahleinbauteilen, die in die Schalung der zu fügenen Bauteile eingelegt werden. Die Stahleinbauteile befinden sich an den beiden Verbindungsflächen von Betonfertigteilen. Das Stahleinbauteil besitzt auf der Betonseite eine betonseitige große Stahlverzahnung, um die Kräfte aus dem Betonbauteil in das Stahleinbauteil einzuleiten. Auf der gegenüberliegenden Seite besitzt das Stahleinbauteil eine feine Stahlverzahnung, mit der die Kräfte von einem Stahleinbauteil zum anderen übertragen werden. Beide Fertigteilenelemente werden an der feinen Stahlverzahnung aneinander gesetzt. Über eine Gewindestange wird die Verbindung vorgedrückt. Damit werden die feinen Stahlzähne in ihrer Lage gesichert. Die Gewindestange verläuft in einem Langloch (Hüllrohr) und nimmt ausschließlich Zugkräfte auf. Die Vertikalkräfte werden über die feine Stahlverzahnung übertragen.

Innovation

Die modulare Verbindung ist in vielfältigen Anschlusssituationen im Stahlbetonfertigteilbau einsetzbar und lässt eine trockene Fügung der Elemente zu. Die Fertigteile werden separat gefertigt und auf der Baustelle montiert. Die Verbindung kann große Kräfte übertragen, ist robust und duktil. Eine effiziente Herstellung und Montage ist möglich. Der Toleranzausgleich funktioniert indem die Stahleinbauteile bei Bedarf um einen oder mehrere der feinen Stahlzähne versetzt werden. So kann die Lage der Einbauteile innerhalb der üblichen Hochbautoleranzen bis auf eine halbe Zahnbreite (= 1,8mm) exakt platziert werden.

Einsatzgebiete

Stützen können hergestellt werden, ohne dass die Standardschalung wegen der individuellen Konsolenschalung unterbrochen wird. Es ist auch nicht mehr notwendig die Konsole in einen zweiten Betoneschritt gegen die bereits erhärtete Stütze zu betonieren. Da die Bauteile auf der Baustelle gefügt werden, können die Stützen einfacher auf der Ladefläche platziert werden. Dadurch wird der Transport effizienter. Auch andere Anschlüsse des Hochbaus, wie zum Beispiel Träger an Stütze oder der Knotenpunkt eines modularen Fachwerkträgers, sind mit dieser Technik herstellbar.

Entwicklungsschritte

Auf Grundlage des Anforderungsprofils und bereits realisierten modularen Verbindungen wird das Verbindungskonzept entworfen. Die darin enthaltene feine Stahlverzahnung wird unter Einbezug einer Analyse von Maschinenelementen (Zahnrad, Gewinde) und darauffolgenden numerischen Parameterstudien entwickelt und optimiert. Diese feine Stahlverzahnung wird in vier Versuchsphasen experimentell und numerisch untersucht. Zuerst erfolgt die Betrachtung isoliert an kleinformatigen Stahlprismen mit schräger gezahnter Grenzfläche. In einem zweiten Schritt werden Stahleinbauteile eingebettet in ein Betonprisma getestet. In den beiden letzten Phasen werden Konsolen und Fachwerkknoten im Maßstab 1 zu 1 untersucht. Zur Bemessung wird sowohl für das Stahleinbauteil, als auch für die Verbindung ein Ingenieurmodell entwickelt und dieses mittels numerischen FE-Analysen validiert.

Abstract

Precast concrete construction elements are typically limited in their size due to transportation route restrictions. As a consequence, reinforced concrete joints, which must transmit large forces between the precast-elements, are still cast on site. This on-site casting often calls for significant space in order to accommodate the formwork, as well as skilled labour. Weather conditions (e.g. heat, cold, humidity) further complicate the quality control process. Another issue is the construction of corbels at precast plants, for which further steps are needed. Both scenarios would benefit from a new type of connection to enable more economical and modular assemblies. The introduction of such a connection is the subject of this doctoral thesis. The connection consists of two toothed steel components. Each is cast into one concrete element. They are subsequently joined via a threaded rod. This allows safe, robust, and efficient force transmission and offers the added benefits of being easy to produce in the factory and rapidly assembled and disassembled in the field. As a result, sections can also be easily transported, and rebuilt elsewhere if needed.

The angle θ at which the compression strut acts on the connection should be as flexible as possible in order to permit a broad range of forces acting at an angle. The forces are transmitted from one concrete section through the transmitting side steel tothing to the adjacent, recipient side steel tothing and then to the attached recipient concrete piece.

Various tothing geometries were developed. For each arrangement, the load carrying capacity was determined both on paper and in experimental trials. Consideration was also given to tolerances with respect to both manufacturing and erection concerns. First, standard steel gears known from mechanical engineering applications were analysed and examined to determine whether they could potentially be adapted for the construction industry. Threads (e.g. Whitworth, trapezoidal) were used as a basis for further investigations. The tooth geometry was optimised based on the outcomes of these initial studies.

In the first test phase, a pair of toothed, shear surfaces under various angles θ were tested. The global and local deformation measurements that were achieved demonstrated sufficient correlation between numerical and experimental results.

The influence of the concrete on the stress distribution in the embedded steel inlay on the overall structural behaviour was considered in a further test phase. Toothed steel inlays were embedded in the concrete prisms at angles θ varying from 30° to 70° to the vertical. The range of angles represents the lower and upper limits of the compression strut angle when applied in practice (e.g. truss and corbel nodes). High-strength concrete was used in order to ensure that the ultimate capacity of the connection is limited by the steel-to-steel interface rather than by means of a concrete or steel/concrete failure. The concrete prisms with steel inlays are loaded using compression force. The laboratory test setup takes into account the detection of potential concrete cracks as well as deformation measurements of the steel inlay, potential gap formation in the steel-to-steel joint, as well as delamination of the steel to concrete interface. The results showed that the steel-to-concrete interface in combination with the stiffness of the steel inlay resulted in a balanced stress distribution in the steel inlay and, therefore, an even distribution of the forces transmitted by the teeth. The load transmitting capacity of the connection was limited by the failure of the steel-to-steel interface. The connection benefits from the ductile deformation of the steel teeth.

In large 1:1 scale trials, the connection was tested on truss and corbel nodes. The load and deformation behaviour of the connection was investigated. The results obtained during previous small-scale tests corresponded well with the results achieved in the full scale application. The results showed that the compression strut angle θ has a major impact on the failure load. While a target angle of approximately 45° can be easily achieved with the truss joint connection, this is more difficult for the corbel application. The geometry of the corbel has to be tailored in order to achieve the most efficient angle of the compression strut. The test results showed that a high load transfer is possible with the introduced modular connection.

In this thesis, an engineer's model has been used to describe the force flow and the tensions on the teeth. The same model has been applied to explain how the connection works.

Finally, a design proposal for the steel tothing as well as for the connection is presented. For the connection, a general design proposal is described. This is specified for the corbel and the truss node.

1. Einleitung

1.1 Einordnung der Thematik und Motivation

Die neue Verbindung stellt eine Erweiterung der Verbindungsmöglichkeiten im Stahlbetonfertigteiltbau dar. Fertigteile auf der Baustelle trocken miteinander zu fügen, ist insbesondere für Anschlüsse, die in einer Ebene erfolgen sollen, nur mit Ausklinkungen oder stahlbaumäßigen Anschlüssen möglich. Das betrifft eine Vielzahl von Anschlusssituationen, wie zum Beispiel Träger an Stütze oder Nebenträger an Hauptträger. Die neue Verbindung bietet hier die Möglichkeit, diese Bauteile kraftschlüssig und ohne Querschnittsschwächung in einer Ebene zu verbinden.

Große und komplexe Strukturen, wie zum Beispiel Stahlbetonfachwerke, werden meist vor Ort betoniert. Dies erfordert einen großen Platzbedarf und aufwendige Baustelleneinrichtung. Durch die Witterungseinflüsse (Hitze, Kälte, Feuchtigkeit) auf der Baustelle ist es schwieriger, die erforderliche Qualität sicher zu stellen. Durch Auflösen des Fachwerkträgers in modulare Elemente kann mithilfe der neuen Verbindung eine Herstellung der Einzelteile im Werk erfolgen und der komplette Träger auf der Baustelle montiert werden (vgl. Falter et al. 2018).

Konsolen werden im Stahlbetonfertigteiltbau i.d.R. monolithisch mit der Stütze verbunden (Abb. 1.1). Dazu ist es notwendig, die Standardschalung zu unterbrechen und die Konsolenschalung individuell herzustellen. Auch beim Transport der Stützen stellen Konsolen eine Störstelle dar. Dies ist für die Fertigteilt-Unternehmen ein zusätzlicher Aufwand, der sich auf die Wirtschaftlichkeit auswirkt.

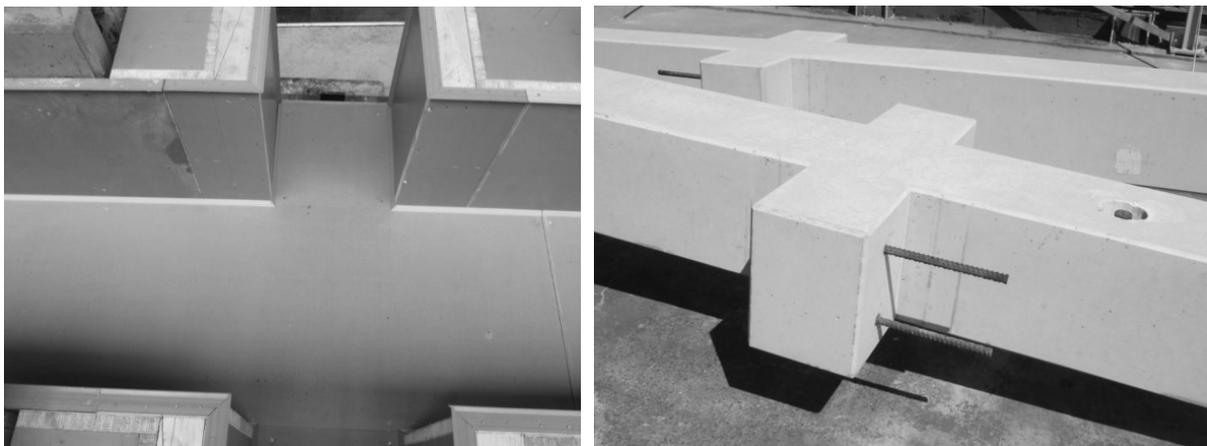


Abb. 1.1: Konsolenschalung (links) und fertige Konsole an Stütze (rechts)

Verschiedene Entwicklungen haben dazu geführt, dass Konsolen nachträglich an Stützen anbetoniert werden. Jedoch erfolgt dies immer in zwei Betonageschritten, bei denen die bereits erhärtete Stütze der Konsole als Schalung dient. Dadurch wird zwar erreicht, dass die Standardschalung nicht mehr unterbrochen werden muss, das Verfahren mit zwei Betonageschritten ist dennoch immer noch sehr aufwendig und wird meist auf der Baustelle durchgeführt. Mit der neuen Verbindung können die Stütze und die Konsole getrennt voneinander und gleichzeitig betoniert werden. Die einzelnen Bauteile werden auf der Baustelle montiert.

1.2 Ziel der Arbeit und Lösungsweg

Das Ziel der hier vorliegenden Arbeit ist es, die Entwicklung einer modularen Verbindung, die bei verschiedenen Anschlusssituationen im Stahlbetonfertigteiltbau eingesetzt werden kann und eine trockene Fügung der Elemente zulässt. Verschiedene Bauteile, z. B. Anschluss „Konsole an Stütze“, „Träger an Stütze“ oder der Knotenpunkt eines modularen Fachwerkträgers (Abb. 1.2), werden separat gefertigt und auf der Baustelle montiert. Des Weiteren weist die Verbindung ein robustes und duktileres Verhalten auf, sie kann Toleranzen ausgleichen und große Kräfte übertragen. Eine effiziente Herstellung und Montage sind möglich. Diese Anforderungen erfüllt die neue Verbindung mithilfe von zwei gezahnten Stahleinbauteilen. Die Stahleinbauteile befinden sich an den beiden Verbindungsflächen der Betonfertigteile. Das Stahleinbauteil hat auf der Betonseite eine Stahlverzahnung mit großen Stahl-

zählen, um die Kräfte aus dem Betonbauteil in das Stahleinbauteil einzuleiten. Auf der gegenüberliegenden Seite hat das Stahleinbauteil feine Stahlzähne, mit denen die Kräfte von einem Stahleinbauteil zum anderen übertragen werden. Die Kraftübertragung zwischen den Fertigteilen erfolgt durch das formschlüssige Ineinandergreifen der feinen Stahlzähne der Stahlleisten (Abb. 1.3). Der Formschluss wird durch eine senkrecht zur Zahnleiste verlaufende und ohne Verbund vorgespannte Gewindestange gewährleistet. Die angreifende Kraft verläuft unter dem Winkel θ . Durch Aufbringen einer Vorspannkraft P auf die Gewindestange kann der Kraftneigungswinkel θ beeinflusst werden.

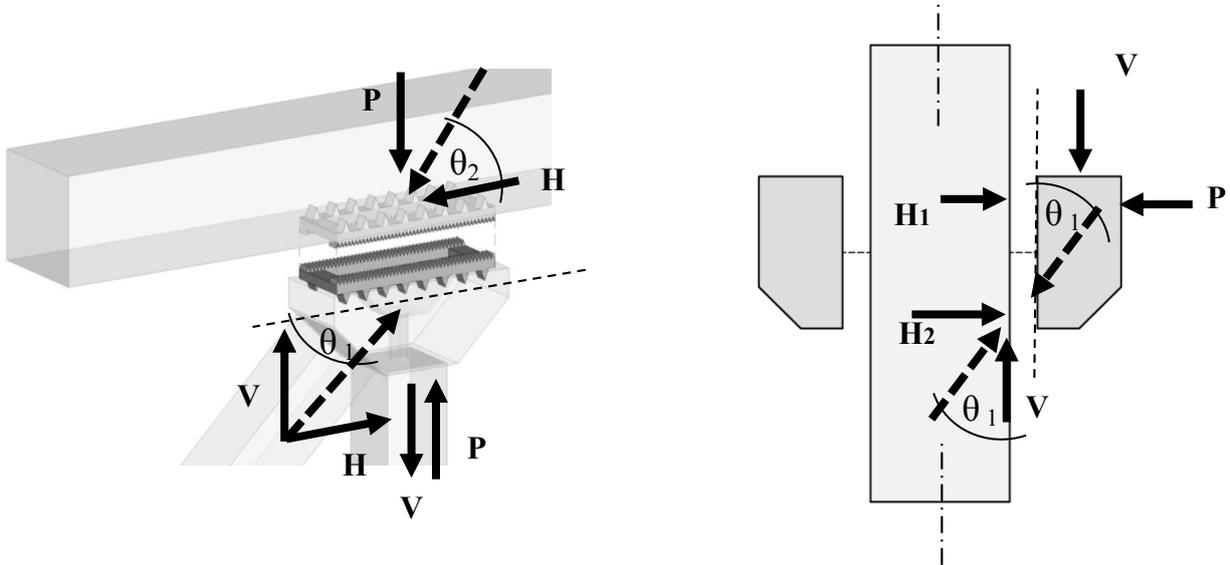


Abb. 1.2: Darstellung der Kraftübertragung im Bauteil (Schmidt 2018)

Die Verbindung ist so konzipiert, dass der Winkel beliebig sein und sich auch die Krafrichtung umdrehen kann.

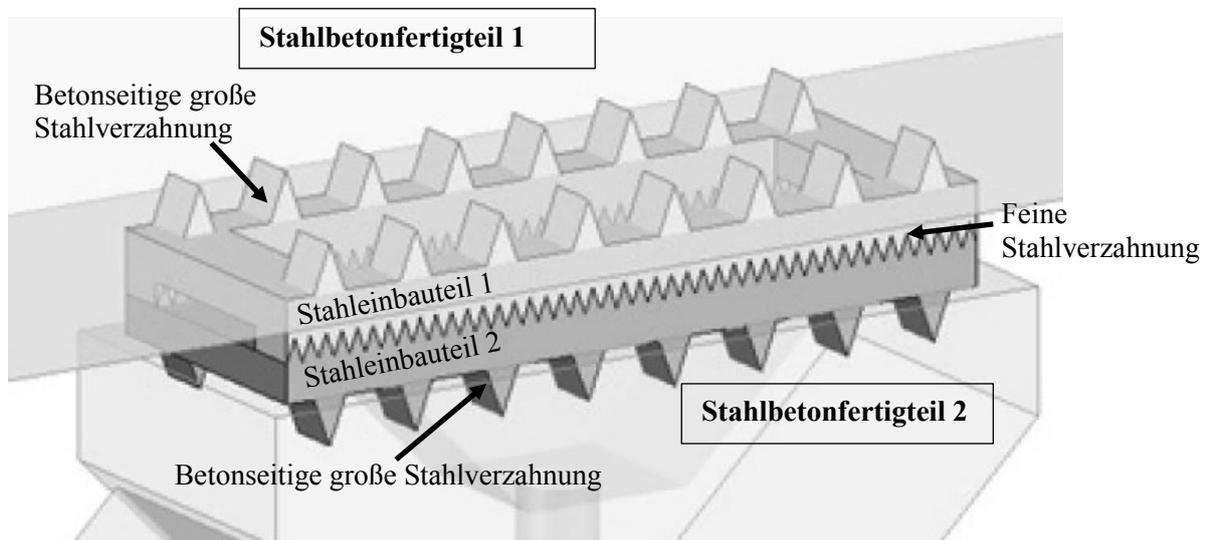


Abb. 1.3: Prinzipielle Darstellung der betonseitigen großen Stahlverzahnung und der feinen Stahlverzahnung

Im Kapitel 2 werden bereits angewendete modulare Stahlbetonkonstruktionen sowie modulare Füge-techniken vorgestellt. Es werden Anforderungen für die modulare Verbindung definiert und Fertigungstoleranzen diskutiert. Die Entwicklungsschritte zum Stahleinbauteil werden aufgezeigt. Das Stahleinbauteil ist der innovative Kern des Verbindungskonzepts.

Die darin enthaltene feine Stahlverzahnung wird im Kapitel 3 unter Einbezug einer Analyse von Maschinenelementen und darauffolgenden numerischen Parameterstudien entwickelt, optimiert sowie an kleinformatischen Stahlprismen experimentell untersucht (Versuche zur Zahngeometrie, Phase I). Dabei wird die Stahlverzahnung isoliert betrachtet. Die durchgeführten Versuche werden in einem numerischen Modell abgebildet.

Die entwickelte Stahlverzahnung wird verwendet, um die modulare und duktile Verbindung von zwei Stahlbetonbauteilen zu ermöglichen. Dieser Schritt wird in Kapitel 4 aufgezeigt. Ähnlich wie die Untersuchungen von Mangerig et.al (2011) an Kopfbolzendübeln und Betondübeln oder auch die Versuche von Tandler (2013) an Zahnleisten wird dabei die entwickelte Verzahnung in Kleinversuchen (Phase II) eingebettet in Beton betrachtet. Dazu werden die Stahlzahnleisten unter einem Winkel θ in Betonprismen platziert. Somit werden Erkenntnisse über das lokale Trag- und Verformungsverhalten der Zahnleiste mit angrenzenden Beton gewonnen. Die Versuche werden ebenfalls an einem numerischen Modell abgebildet.

Im Kapitel 5 wird der Einsatz der in den vorangegangenen Schritten entwickelten Verbindung im Stahlbetonfertigteilbau beschrieben. Anhand einer Literaturrecherche werden bereits durchgeführte Untersuchungen an ähnlichen Konstruktionen aufgezeigt.

Im Kapitel 6 werden Versuche an Konsolen (Phase III) und in Kapitel 7 Versuche am Knotenpunkt eines modularen Fachwerkträgers (Phase IV) im Maßstab 1 zu 1 durchgeführt. Dabei soll das Trag- und Verformungsverhalten der ganzen Verbindung untersucht werden. Beide Versuchsdurchführungen werden in einem numerischen Modell abgebildet.

Für das Stahleinbauteil mit der feinen Stahlverzahnung wird im Kapitel 8 ein Ingenieurmodell entwickelt.

Zur Bemessung einer modularen Verbindung wird in Kapitel 9 ein allgemeiner Bemessungsvorschlag gemacht. Für die Anwendungsfälle der Konsole und des Fachwerkknotens wird dieser konkretisiert.

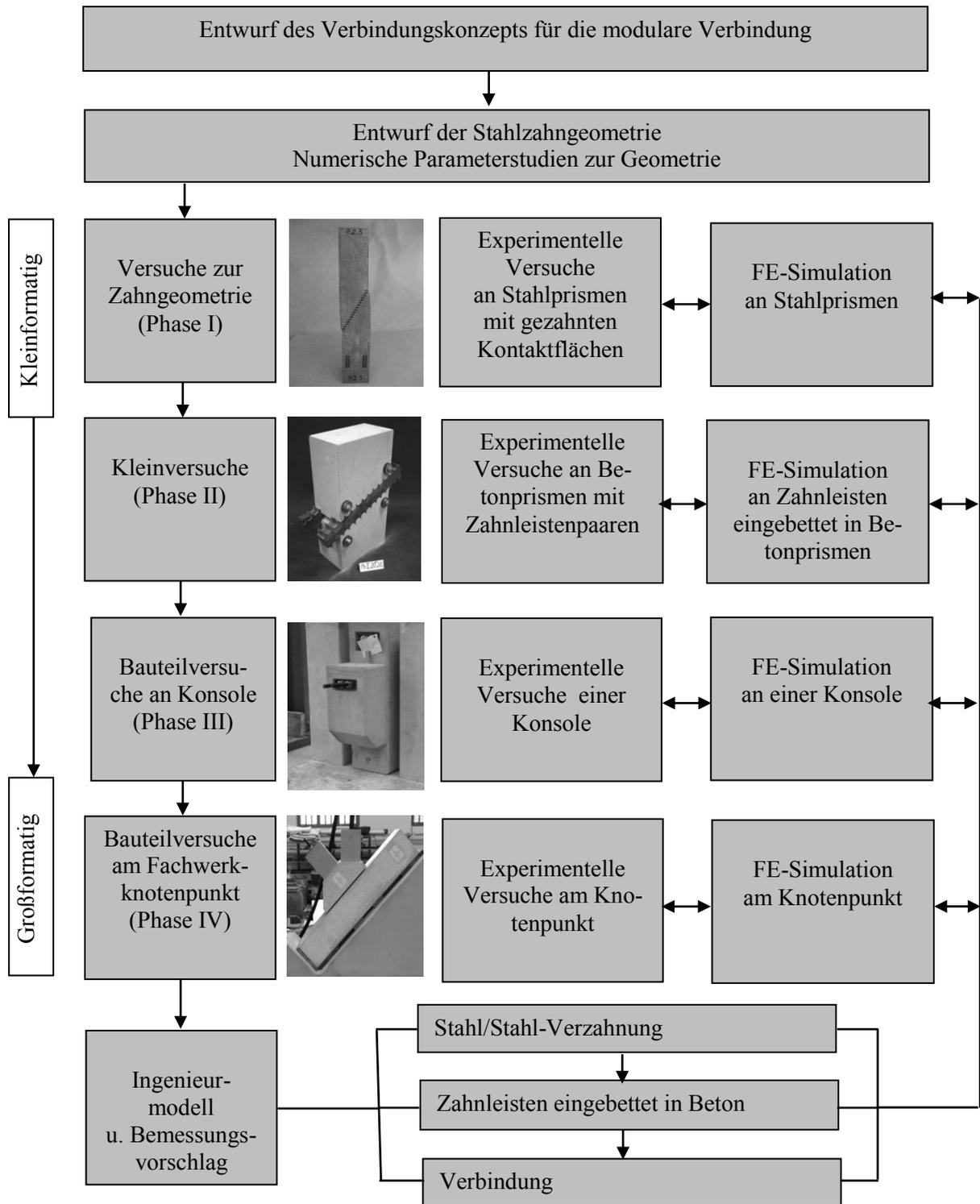


Abb.1.4: Darstellung der Entwicklungsschritte

2. Entwurf eines neuen modularen Verbindungskonzeptes

2.1 Stand der Forschung und Technik zu modularen Konstruktionen im Betonfertigteilbau

2.1.1 Etablierte Systeme

Auflagerungen

Im Stahlbetonfertigteilbau werden Bauteile häufig auf die darunter liegenden Elemente aufgelegt. Dies erfolgt i.d.R. mit einer trockenen Fuge und stellt eine modulare Kraftübertragung dar. Die Lagesicherung wird über Dorne oder Verschraubungen hergestellt. Die Hüllrohre, in denen die Dorne sitzen werden zur Kraftschlüssigkeit meist nachträglich vergossen. Dertartige Auflagerungen werden z.B. beim Anschluss „Träger auf Stütze“, „Träger auf Konsole“, „Nebenträger auf Hauptträger“ oder „Träger auf Wand“ verwendet. Sollen die Bauteile in einer Ebene sitzen, können Ausklinkungen konstruiert werden. Die Lager für Stahlbetonfertigteilkonstruktionen sind im Eurocode 2 (DIN EN 1992-1-1:2011-01) im Kapitel 10.9.4 geregelt. Zusätzliche Informationen können auch DAfStb (2012) entnommen werden.

Stützenstöße

Stützenstöße mit reiner Druckkraft sind ebenfalls im Eurocode 2 geregelt. Darüber hinaus werden biegesteife Stützenstöße mit Stützenschuhen ausgebildet. Diese sind per allgemeiner bauaufsichtlicher Zulassung geregelt. Dabei werden Stahleinbauteile verwendet (s. Abb. 2.1). Im Bauteil A wird Bewehrung angeschweißt, welche mit der Stützenlängsbewehrung übergreift. Im Bauteil B schließt die Längsbewehrung des Nachbarbauteils über Verschraubung an.



Abb. 2.1: Fotos eines eingebauten Stützenschuhs mit 8 Verschraubungen (links); Stützenschuhdarstellung der Fa. Halfen (Halfen 2011) (rechts)

2.1.2 Konsolen

Überblick zu Entwicklungen an Konsolen

Als Konsole wird die Konstruktion bezeichnet, wenn die Konsolhöhe h_c größer oder gleich dem Lastabstand a_c ist (vgl. Abb. 2.2 mitte). Bei größerem Lastabstand handelt es sich um einen Kragarm. Sie werden historisch zunächst meist nur zur Auflagerung von Kranbahnen genutzt. Mit voranschreitendem Einsatz der Fertigteilbauweise erweitert sich der Einsatz von Konsolen als Auflager für jegliche Konstruktionselemente. Somit entsteht die Notwendigkeit, das Tragverhalten von Konsolen näher zu erforschen. Eine erste Arbeit dazu liefert Niedenhoff (1961), in der monolithische Konsolen theoretisch, spannungsoptisch an homogenen Gießharzmodellen sowie experimentell untersucht werden (Abb. 2.2). Weitere Forschungen erfolgen durch Kritz/Raths (1965) an Konsolen mit und ohne Bügelbewehrung und durch Mehmel/Freitag (1967) an Konsolen mit unterschiedlicher Bügelbewehrung. Eibl/Zeller (1983) untersuchen den Einfluss des Bewehrungsgrades auf das Tragverhalten. Bei hochbewehrten Konsolen mit einem Verhältnis $a/h = 1,0$ zeigt sich, dass außer den bis dahin verwendeten

2. Entwurf eines neuen modularen Verbindungskonzeptes

Horizontalbügel auch Vertikalbügel einzubauen sind. In Chakrabarti et al. (1987) werden monolithische Konsolen vorgespannt bzw. teilweise vorgespannt. Abdul-Wahab (1989) und Fattuhi et al. (1989) führen experimentelle Untersuchungen zur stahlfaserbewehrten Konsole durch und Fattuhi (1990) betrachtet die Interaktion von Konsole und Stütze. Eibl/Zeller (1993) untersucht Druckdiagonalen besonders im Hinblick auf ein großes a_c/h_c -Verhältnis. Foster/Powell/Selim (1996) führten Untersuchungen an Konsolen aus hochfesten Betonen durch.

Niederhoff (1961) bemisst die Konsole mit einem Stabwerkmodell, indem sich die in die Konsole vertikal eingeleitete Kraft über eine Druckstrebe abstützt und über eine Zugstrebe in der Stütze verankert wird (Abb. 2.2). Darauf folgen viele Veröffentlichungen zur Konsolbemessung, so zum Beispiel Hagberg (1966 u. 1983), Leonhard/Mönnig (1975 u. 1977), Steinle/Hahn (1988 u. 1995), Jennewein/Schäfer (1992), Eligehausen/Gerster (1993) und Schlaich/Schäfer (1993 u. 2001).

Diese Forschungen stellen die Grundlage für die Bemessungsmodelle nach Eurocode 2 (2010), Heft 525 bzw. 600 des Deutschen Ausschuss für Stahlbeton (DAfStb. 2012), Steinle (Steinle/Hahn 1988), Reineck (2005) und Fingerloos/Stenzel (2007) dar. Auch Bemessungsmodelle in anderen Ländern nutzen Stabwerkmodelle. Beispielhaft sei hier für die USA der Building Code Requirements for Structural Concrete and Commentary (ACI 318-14, 2014) genannt.

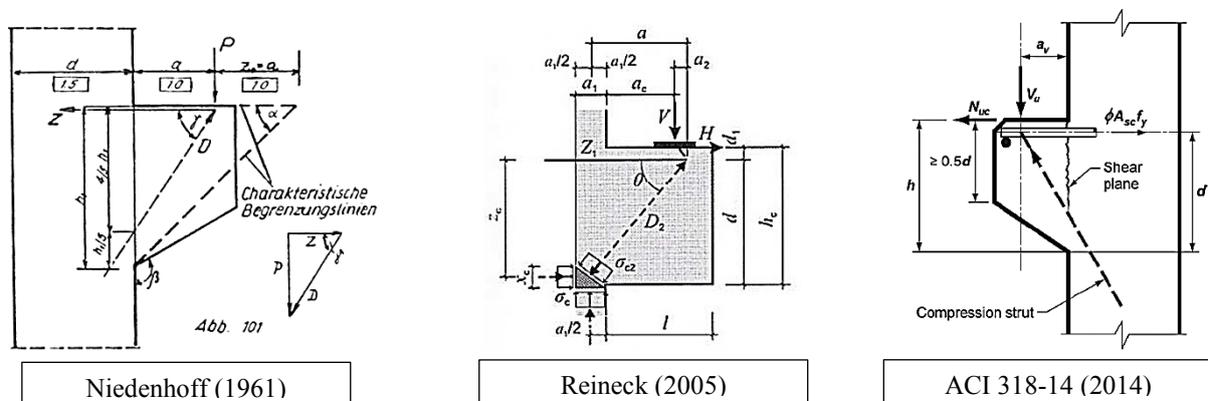


Abb. 2.2: Beispielhafte Stabwerkmodelle aus der Literatur

Darüber hinaus werden auf dieser Grundlage Untersuchungen zu nachträglich anzubringenden Konsolen gemacht sowie Patente ausgestellt.

Birkle et al. (2001) nutzt zur Aufnahme der Zugkräfte Doppelkopfstäbe. Hegger et al. (2004) verwenden diese Untersuchungen um Konsolen mittels Doppelkopfstäben nachträglich an eine Stütze zu betonieren. Durch einen Rechteckanker werden dabei besonders kurze Verankerungslängen erreicht. Weitere Entwicklungen zu modularen Konsolen werden nachfolgend aufgeführt.

Patent DE 19952594 (Halfen 2008)

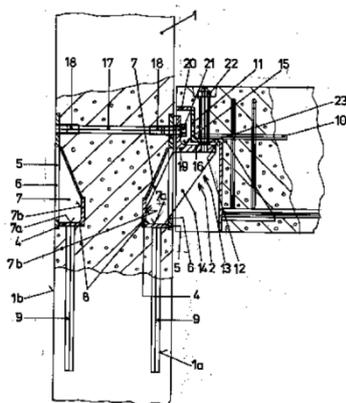
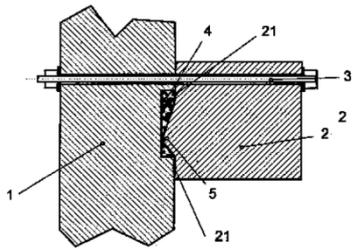


Abb. 2.3: Nachträgliche Konsole mit Stahlbauanschluss

Die Konsole ist hier ein reines Stahlelement (Abb. 2.3). Zusätzlich ist sowohl in der Stütze als auch im Träger ein Stahleinbauteil vorzusehen. Aufgrund der genannten Stahleinbauteile ist eine derartige Konstruktion relativ aufwendig.

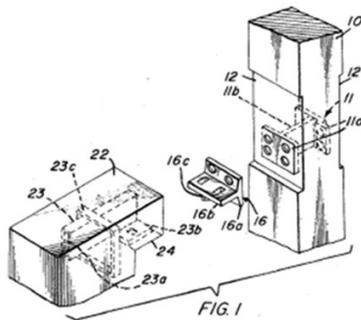
Patent DE 10200700919 (BTU Cottbus 2009)



Bei dieser Variante wird durch eine Einlage in der Stützenschalung eine Aussparung vorgesehen, in der sich die Druckstrebe der im zweiten Schritt anbetonierten Konsole abstützen kann (Abb. 2.4). Die Aussparung wird so gewählt, dass sie im Bereich der Betondeckung ist und nicht in die Bewehrung eingreift. Die Zugkraft wird über eine Verschraubung aufgenommen.

Abb. 2.4: Nachträglich anbetonierte Konsole mit Betonknacke

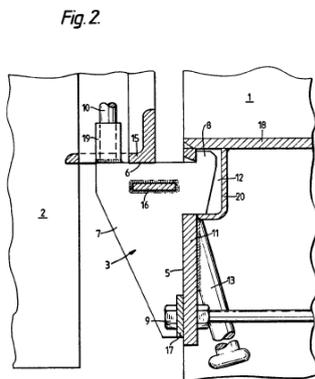
Patent US 3513610 A (D. K. Devonport 1970)



Dieser Träger/Stützen-Anschluss wird über eine Stahlkonsole realisiert (Abb. 2.5). Diese Stahlkonsole wird an einem Stahleinbauteil, welches sich in der Stütze befindet, verschraubt. Im anschließenden Bauteil (Träger) befindet sich ebenfalls ein Stahleinbauteil. Auch hier findet eine Verschraubung statt. Die vielen aufwendig gefertigten Stahleinbauteile erfordern einen hohen Aufwand. Die Kraftübertragung geschieht über Scherbeanspruchung.

Abb. 2.5: Modularer Anschluss mit angeschraubten Stahlbauteilen

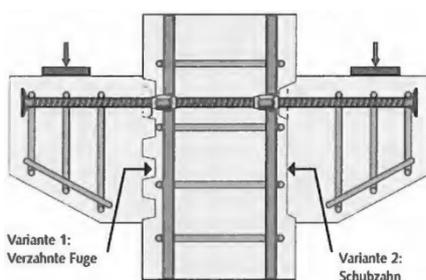
Patent GB2179115



Ähnlich wie bei dem Patent DE 19952594 wird die Konsole aus Stahl gefertigt sowie in den angrenzenden Stahlbetonbauteilen Stahleinbauteile vorgesehen (Abb. 2.6). Die Zugkraftübertragung findet hier jedoch über einen in der Konsole integrierten Haken statt.

Abb. 2.6: Modularer Anschluss mit angeschraubten Stahlbauteilen

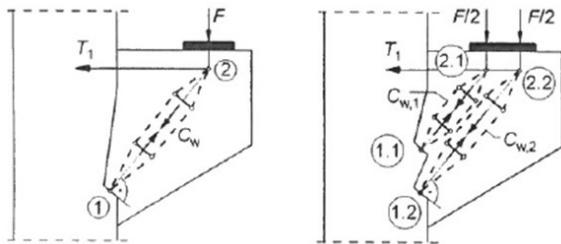
HSC Stud Connector (Halfen 2017)



Die Kraftübertragung erfolgt in Variante 1 über eine verzahnte Fuge gem. EN 1992-1-1, in Variante 2 über einen Schubzahn. Gemäß der Allgemeinen bauaufsichtlichen Zulassung Nr. Z-21.8-1973 ist für modulare Konsolen die gleiche Druckstreben-tragfähigkeit anzusetzen wie bei monolithischen Konsolen.

Abb. 2.7: Nachträglich anbetonierte Konsole mit Betonknacke oder Betonverzahnung (Halfen 2016)

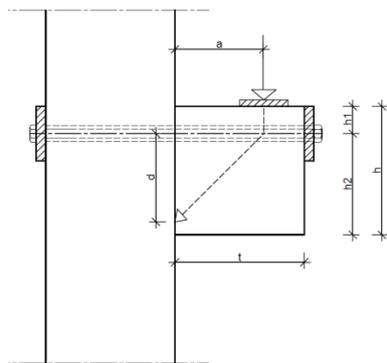
Schwitzke (2011)



In der Arbeit von Schwitzke (2011) wird die Konstruktion des Patents DE 102004041289 A1 ausführlich experimentell und numerisch untersucht sowie ein Bemessungsvorschlag erarbeitet.

Abb. 2.8: Nachträglich anbetonierte Konsole mit Betonknacke (Schwitzke 2011)

Nachträgliche Konsole nach Steinle/Hahn



Die nachträgliche Anbringung einer Konsole mittels vorgespannter Gewindestange wird in Steinle et al. (2017) nach DIN EN 1992 bemessen. Da die Querkraft ausschließlich über Reibung abgetragen werden kann, sind die übertragbaren Lasten sehr gering. Nach Auffassung von Steinle/Bachmann/Tillmann kann auf eine Vermörtelung der Fuge verzichtet werden, ohne dass extreme Anforderungen an die Ebenheit der Fuge gestellt werden müssen.

Abb. 2.9: Nachträglich angeschraubte Konsole nach (Steinle et al. 2017)

2.1.3 Fachwerkknoten und weitere modulare Elemente

Henze

Henze (2009) löst den klassischen Fachwerkträger in seine einzelnen Elemente auf (Abb. 2.10). Es wird ein Knotenelement entworfen, über das alle Bauteile miteinander mittels verbundloser Vorspannung zusammengehalten werden. Die Kraftübertragung zwischen den Betonelementen erfolgt über Reibung.

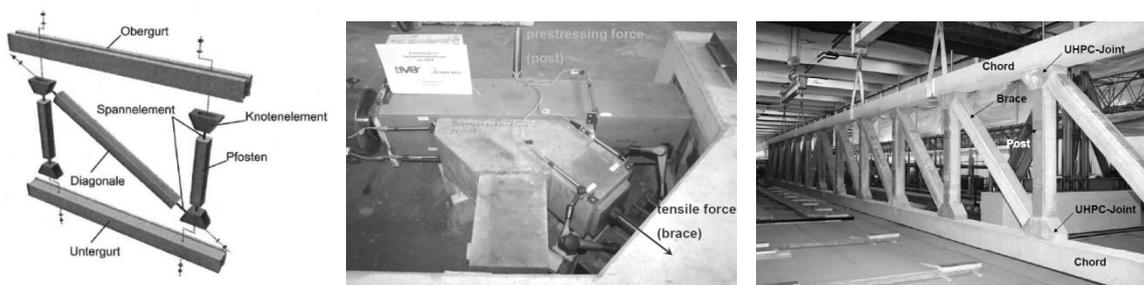


Abb. 2.10: Fügung über Knotenelemente; links: Darstellung der Elemente (Henze 2009); mitte: Knotenelement im Versuchsaufbau (Henze 2009); rechts: Demonstrator (Tue 2013)

Rautenförmige Elemente

In den USA werden 1986 modulare Rautenelemente entwickelt, die über einbetonierte Stahlplatten miteinander verbunden werden.

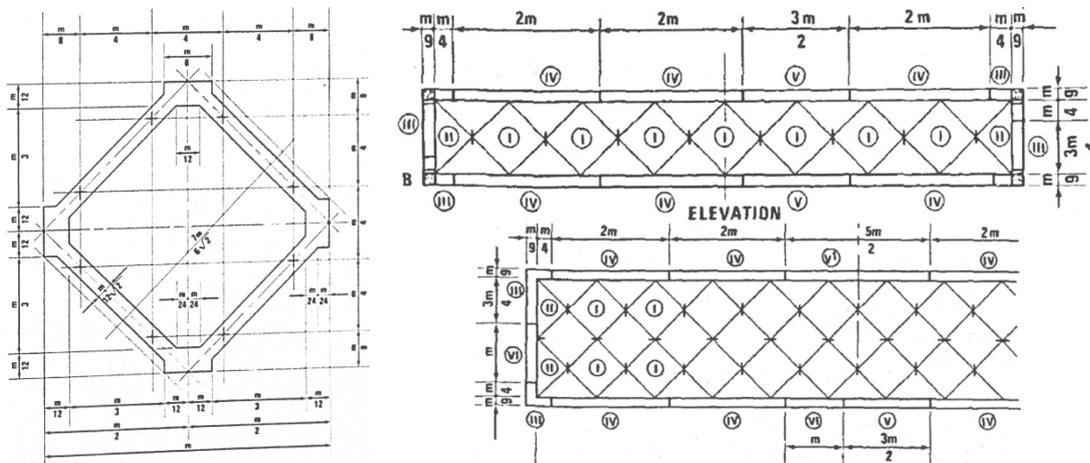


Abb. 2.11: Rautenförmige Bauweise (Wechsler 1986)

Wabenrahmen

Im Forschungsprojekt „Honey Comb Tube Architectur“ werden in Japan bienenwabenförmige Betonelemente über Vorspannung ohne Verbund miteinander gefügt.

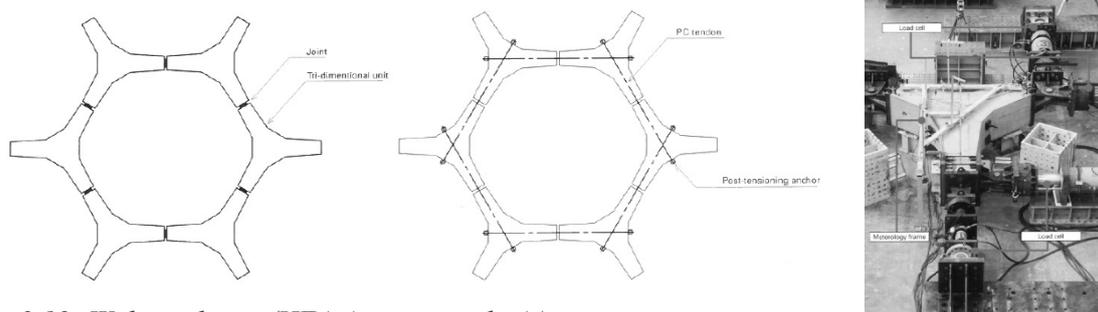


Abb. 2.12: Wabenrahmen (HTA Association k. A.)

2.1.4 Zusammenfassung und Darstellung des Forschungsbedarfs zu modularen Verbindungen

Der Stahlbetonfertigteiltbau hat Vorteile in der Qualität und der Wirtschaftlichkeit. Allerdings sind die Vorteile und der erfolgreiche Einsatz von Fertigteilkonstruktionen von der Verbindung der Bauteile untereinander abhängig. Die Verbindung zwischen zwei Stahlbetonfertigteilen erfolgt häufig über trockene Lagerfugen. Dabei werden die Bauteile aufeinandergelegt, es erfolgt eine Kraftübertragung in vertikaler Richtung. Um die Konstruktion in einer Ebene anzuschließen, werden Ausklinkungen verwendet. Die Lagesicherung übernimmt ein Dorn, der i.d.R. vergossen wird. Ein weiteres etabliertes System sind Stützenschuhe um Stützen in Längsrichtung miteinander zu stoßen. Dabei können vertikale und horizontale Kräfte sowie Momente übertragen werden. Diese Systeme stellen grundsätzlich modulare Konstruktionen dar, die auf der Baustelle gefügt werden. Jedoch ist bei diesen Konstruktionen eine große Konstruktionshöhe notwendig, wenn Bauteile aufeinander gelegt werden oder bei Ausklinkungen eine Schwächung des Querschnitts erforderlichlich.

Auch bei der Konstruktion von Konsolen werden verschiedene Möglichkeiten aufgezeigt, um den Anschluss einer Konsole an eine Stütze modular auf der Baustelle herzustellen. Das geschieht zum Beispiel über aufwändige Stahlbauanschlüsse oder das Kontaktverfahren (Match-Cast-Verfahren), bei dem die Konsole mithilfe einer Betonknagge nachträglich an die bereits erhärtete Stütze betoniert wird.

Alle nachträglich anzubringenden Konsolen mit Stahlbauteil haben den Nachteil, dass die Ausführung in der Herstellung sehr aufwendig ist, da die Stahlbauteile sehr komplex sind. Bei den Überle-

gungen zur Beton/Betonfuge stellt die Genauigkeit eine große Herausforderung dar. Deshalb muss die Konsole entweder nachträglich direkt an die Stütze betoniert oder die Fuge zwischen Konsole und Stütze vergossen werden. Lediglich die nachträgliche Konsole nach DIN EN 1992 (DIN EN 1992-1-1) lässt bei entsprechend geringen Lasten eine Montage ohne Verguss zu. Dabei werden die Vertikalkräfte ausschließlich über Reibung übertragen.

2.2 Stand der Technik und Forschung zu Fügungsmethoden modularer Konstruktionen

2.2.1 Reibung

Die Kraftübertragung zwischen Stahlbetonbauteilen kann über eine Reibungsfuge erfolgen. Ruth (1993) beschäftigt sich Anfang der 1990er Jahre mit dem Werkstoffverhalten in Grenzflächenbereichen. Er untersucht vertieft die Versuchsergebnisse von Eibl (1990), Nissen (1987) und Walraven (1978), welche die Reibung zwischen Beton und Beton behandeln. Die Reibung zwischen Stahl und Beton wird in der Arbeit von Roik (1978) fokussiert und untersucht. In der DIN EN 1992-1-1 Kapitel 10.9.4.3 Absatz (3) ist die Berechnung von trockenen Lagerfugen geregelt. Diese dürfen in der Regel nur dann verwendet werden, wenn die erforderliche Qualität der Bauausführung erreicht werden kann. Dabei ist die durchschnittliche Lagerpressung zwischen den ebenen Oberflächen auf maximal $0,4 \cdot f_{cd}$ zu begrenzen (DAfAtb Heft 600, 2012 und DIN EN 1992-1-1 10.9.5.2). „Trockene Lagerfugen mit gekrümmten (konvexen) Oberflächen sind in der Regel unter Berücksichtigung der Geometrie zu bemessen.“ (DIN EN 1992-1-1 Kapitel 10.9.4.3 Absatz (3)) Die Lagerfuge berechnet sich durch die durchschnittliche Lagerpressung somit zu:

$$\sigma_{Ed} = \frac{N_{Ed}}{A} \leq 0,4 \cdot f_{cd} \quad (Gl.2.1)$$

mit:

N_{Ed}	Bemessungsnormalkraft senkrecht zur Fuge (z.B. Vorspannung)
A	Auflagerfläche der Pressung
f_{cd}	Bemessungswert der Betondruckfestigkeit

Der Zusammenhang der in der Reibungsfuge aufnehmbaren Tangentialkraft in Folge einer Normalkraft und dem Reibungsbeiwert erfolgt nach Coulomb.

$$\mu = \frac{F_T}{F_N} \quad (Gl.2.2)$$

mit:

μ	Reibungsbeiwert
F_T	Tangentialkraft in der Reibungsfuge
F_N	Normalkraft in der Reibungsfuge

Reibbeiwerte für Beton/Beton-Paarungen sind in (Falter et al. 2018) zusammengefasst.

2.2.2 Betonverzahnung

Bereits Mörsch (1908) nennt in seiner Veröffentlichung über Stahlbeton eine verzahnte Betonfuge als Widerstand gegen Abscheren (Abb. 2.13 links). Forschungsanstrengungen auf diesem Gebiet münden in einer normierten Festlegung für Betonverzahnungen. So sind Betonverzahnungen (Schubnocken) heute in der DIN EN 1992-1-1+NA: 2011, Abschnitt 6.2.5 geregelt. Diese haben eine trapezförmige Geometrie (Abb. 2.13 rechts) und werden immer in zwei Betoneschritten hergestellt.

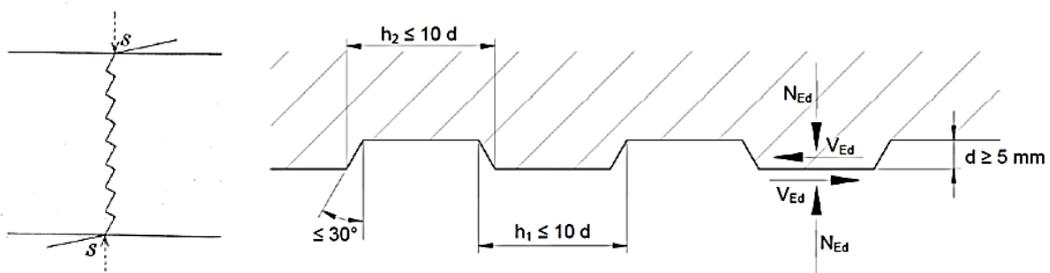


Abb. 2.13: Darstellung einer verzahnten Betonfuge als Widerstand gegen Abscheren nach (Mörsch 1908) (links) und nach (DIN EN 1992-1-1+NA: 2011) (rechts)

Die Kraftübertragung erfolgt über die schrägen Druckflächen und der Reibung. Neben Anwendungen im Hochbau, zum Beispiel bei der Kraftübertragung zwischen Stütze und Fundament sowie Elementplatte und Aufbeton, werden Betonverzahnungen auch bei Segmentbrücken erfolgreich eingesetzt. Bei den genannten Hochbauanwendungen erfolgt die Betonage immer gegen eine bereits erhärtete Schubnocke, wodurch keine Anforderung an die Toleranz gestellt wird. Im Segmentbrückenbau hingegen werden die einzelnen Elemente auf der Baustelle trocken miteinander gestoßen und über eine Vorspannung verbunden. Die Herstellung der Schubnocken erfolgt hier mit dem Kontaktverfahren (Match-Cast-Verfahren), bei dem die Stirnfläche des erhärteten Elements dem neuen Element als Schalung dient. Das als Schalung dienende Element wird entsprechend behandelt, sodass beide Bauteile wieder gelöst und erst auf der Baustelle endgültig miteinander verbunden werden (Empelmann et al. 2014). Oettel (2013) führt experimentelle Untersuchungen an einer trapezförmigen, 1cm hohen Fugenprofilierung durch. Für stabförmige Verbindungen muss aufgrund der begrenzten Kraftübertragungsflächen jedoch Abweichend von der Norm eine kleine und hocheffiziente Betonverzahnung konstruiert werden. Eine solche Verzahnung wird in Falter et al. (2018) und Nettekoven (2019) entwickelt und vorgestellt.

2.2.3 Klebeverbindung

Klebeverbindungen werden beispielsweise mit Epoxidharz oder Reaktionspulverbeton (RPC- Reactive Powder Concrete = hochfester mineralischer Mörtel) hergestellt. Sie sind eine nichtmechanische Verbindung. Die Klebeverbindungen erfordern eine sehr hohe Sorgfalt und unterliegen sehr hohen Anforderungen auf der Baustelle. Sie sind aufgrund von Witterungseinflüssen fehleranfällig (Schöning et al. 2013). Weiterhin sind geklebte Verbindungen im Gegensatz zu Verschraubungen nicht nachträglich zu lösen. Somit verlieren derartige Verbindungen an Flexibilität und entsprechen nicht mehr dem Nachhaltigkeitsgedanken.

Deshalb werden nichtmechanische Verbindungsmittel für die zu entwickelnde Verbindungslösung nicht weiter betrachtet.

2.2.4 Dübelleisten und Betondübel

Verbundkonstruktionen aus Stahl und Stahlbeton werden i.d.R. über Kopfbolzendübel miteinander verbunden. Dabei wird die Schubkraftübertragung über auf dem Stahlträger aufgeschweißte und einbetonierte Kopfbolzen sichergestellt. Die Anwendung und Bemessung von Kopfbolzendübel sind im Eurocode 4 normativ geregelt. Kopfbolzen benötigen Mindestabstände. Das Einsatzgebiet sind im Allgemeinen linienförmige Lasteinleitungen. Zudem besitzen Verbindungen mit Kopfbolzen eine relativ geringe Steifigkeit.

Eine weitere Möglichkeit Schubkräfte zwischen Stahlbauteil und Beton zu übertragen ist die sogenannte Dübelleiste, bei der sich Betondruckstreben im Steg des Stahlträgers abstützen (Abb. 2.14). Das wird durch Aussparungen im Steg erreicht und führt zu einer kontinuierlichen Schubkraftübertragung. In den 1980er Jahren stellt Andrä (1985) bereits erste Überlegungen hierzu an. Durch Leonhard et al. (1987) werden weitere Untersuchungen an einbetonierten perforierten Stahlleisten durchgeführt. In den 1990er Jahren erforscht Mangerig (2000) Dübelleistenverbindungen intensiv. Diese Ergebnisse sind im Stahlbau-Kalender 2005 ausführlich dokumentiert und zusammengefasst. Das Trag- und Verformungsverhalten von Verbundmitteln wird mit genormten Push-Out-Versuchen untersucht. Deren Durchführung sowie die Abmessungen und Auswertungen sind in DIN EN 1994 festgelegt. Diese Versuche liefern die maximale Traglast eines Betondübels P_{max} sowie die dazugehörige Relativverschiebung δ_{max} .

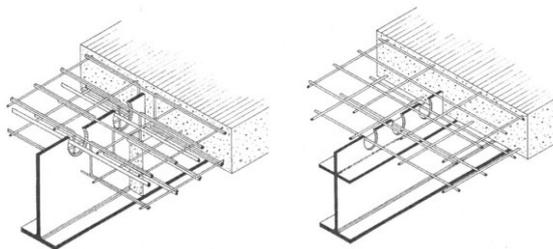


Abb. 2.14: Verbundträger mit Betondübel (Mangerig et.al 2011)

Es gibt viele Bemessungsmodelle für Betondübel. Die für einen möglichen Einsatz in modularen Konstruktionen infrage kommenden Bemessungsmodelle werden nachfolgend aufgeführt. Dabei handelt es sich um Modelle mit kreisförmigen Aussparungen.

- Dübelabschermodell nach Leonhard (Leonhard, Mönning 1986 u. Leonhard et al. 1987)
- Betondübelmodell nach Wurzer (1997)
- Modell nach Zapfe (2001)
- Modifikationsfaktor nach PRECO-BEAM (Wagner 2010 u. Mangerig et al. 2011)
- Modell nach Reitz (2003)
- Modell nach Hauke (2007) und Gründel et al. (2009)

Fischer (2014) untersucht Verbunddübelleisten in dünnwandigen UHPC, um flächige Bauteile miteinander zu verbinden. Aber auch im Bereich von konzentrierten Lasteinleitungen sind Betondübel möglich. Anhand der hohen Tragfähigkeit sind sie ebenfalls für Einbauteile mit beengten Platzverhältnissen einsetzbar (Mangerig et.al 2011). Jedoch muss eine modulare Verbindung mittels Verguss hergestellt werden.

2.2.5 Implantate

Kobler (2013) entwickelt „Implantate“ um hohe Druckkräfte in dünnwandige Bauteile aus UHPC einleiten zu können (Abb. 2.15). Dabei handelt es sich im Gegensatz zur Verbunddübelleiste um eine lokale, konzentrierte Lasteinleitung (Sobek 2011, Kobler 2013). Durch die Geometrie soll eine homogene Krafteinleitung gewährleistet und auch eine Anpassung der Steifigkeiten erreicht werden. Lokale Lasteinleitungen führen immer zu Spannungsspitzen, welche möglichst gleichmäßig werden müssen. Gerade in filigranen Konstruktionen ist dies besonders wichtig, um eine gleichmäßige Ausnutzung des Bauteils zu erreichen. Eine Steifigkeitsanpassung und damit eine Homogenisierung der Lasteinleitung werden durch die Verjüngung erreicht. Die Materialkonzentration am Lastangriffspunkt verhindert eine Spannungsspitze in diesem Bereich. Durch die Verwendung von Titan als Material für Teilbereiche des Implantats wird die Steifigkeitsanpassung weiter verbessert. Titan besitzt im Vergleich zum ebenfalls verwendeten Feinkornbaustahl eine geringe Steifigkeit, aber eine hohe Festigkeit. Durch das doppelt so hohe E-Modul gegenüber den umliegenden UHPC kann die Beanspruchung der Scheibe auf eine möglichst kleine Implantatfläche gebündelt werden. Die Neigungen der Druckstreben können durch das Verhältnis der E-Moduln zwischen Implantat und Bauteil, der Länge der Lasteinleitung sowie der Verjüngung des Leistenquerschnitts beeinflusst werden. Durch Anpassung dieser Einflussgrößen wird der gewünschte Druckstrebenneigungswinkel eingestellt. In Richtung der Leisten Spitze werden die Druckstrebenneigungswinkel immer flacher. Senkrecht dazu wirken die zur Umlenkung der Druckspannungen erforderlichen Zugspannungen. Für die Aufnahme dieser Querspannungen stehen die Zugelemente mit Finnen zur Verfügung. Diese besitzen aufgeschweißte Druckplatten, um die Zugkräfte in den Finnen über Druckkontakt in den Beton einzuleiten. Dadurch verhindern die Finnen eine Rissbildung durch Überschreitung der maximalen Zugfestigkeit des Betons (Kobler 2013).

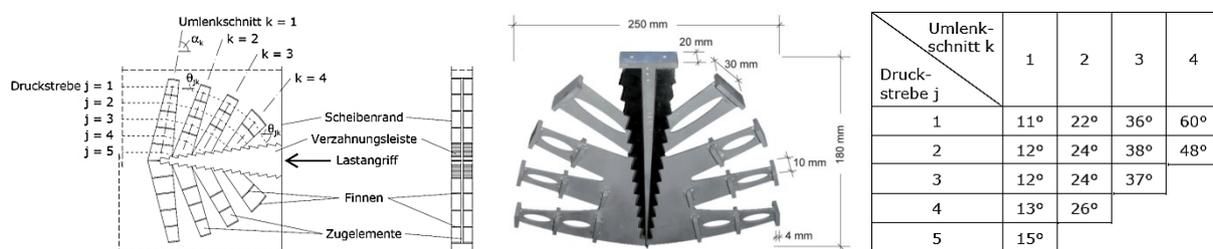


Abb. 2.15: Darstellung des Implantats und Druckstrebenneigungswinkel (Kobler 2013)

2.2.6 Verzahnungen aus Stahl

Verzahnung zwischen Beton und Stahl

Um große Tangentialkräfte lokal in dünne Ortbetonplatten einleiten zu können, entwickelt Schlaich eine sogenannte Zahnleiste aus Guss- oder Baustahl (Schlaich 1992). Die Kraftübertragung zwischen

Zahnleiste und Beton erfolgt über eine Verzahnung, in welcher sich die Betondruckstreben abstützen können (Tab. 2.1). Eingesetzt wird die Zahnleiste beispielsweise bei den Fußgängerbrücken „dreiar-mige Hängebrücke“ am Nordbahnhof und an der Heilbronner Straße in Stuttgart, der seilgestützten Glacisbrücke in Ingolstadt sowie der Straßenbrücke über das Nesenbachtal in Stuttgart (Schlaich et al. 2002).

Tab. 2.1: Anschlussmöglichkeiten Stahlelemente mit Zahnleisten nach (Schlaich et al. 2002)

	Einseitig außenliegende Zahnleiste	Innenliegende Zahnleiste	Zweiseitig außenliegende Zahnleiste
3D Ansicht			
Draufsicht			
Schnitt			

Die Zahnleiste wird von Schmid (2000) analysiert und durch umfangreiche numerische Berechnungen optimiert. Es wird eine optimale Zahngeometrie zur effektiven Kraftübertragung entwickelt und deren Tragverhalten analytisch beschrieben (Abb. 2.16). Dabei werden unterschiedliche Lastneigungswinkel, unter denen die Zahnleiste beansprucht wird, untersucht. Der kleinste Winkel wird mit $\theta = 20^\circ$, der größte mit 70° zur Leistengrundlinie angegeben. Obwohl sich dieser Lastneigungswinkel über die Zahnleiste ändert, wird aus wirtschaftlichen und ausführungstechnischen Gründen eine einheitliche Zahngeometrie gewählt.

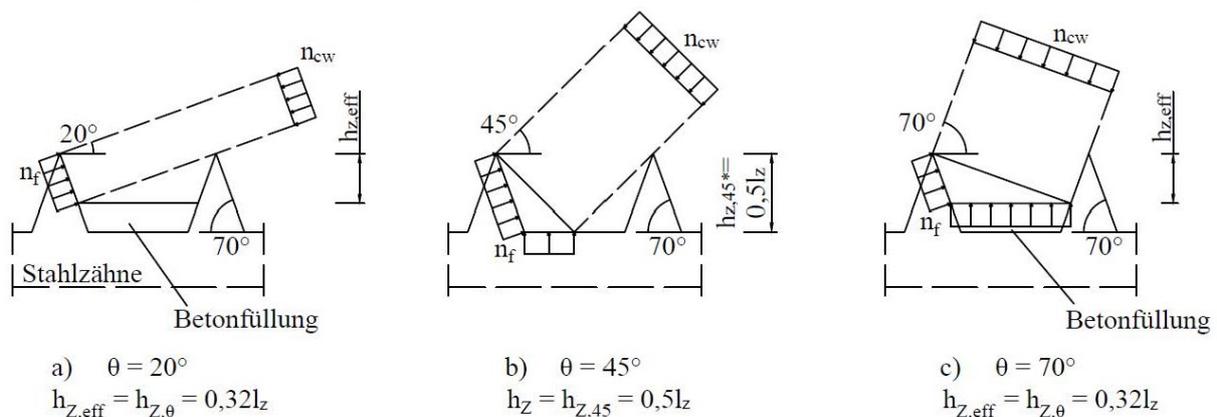


Abb. 2.16: Belastung der Verzahnung unter unterschiedlichen Lastneigungswinkel nach (Schmid 2000)

Die Verzahnung wird so konstruiert, dass das Größtkorn des Betons zwischen den Zähnen eingebaut werden kann. Dann entstehen keine Lufteinschlüsse bzw. Fehlstellen im Beton und die Betondruckstrebe kann sich am Zahn abstützen (Abb. 2.17).

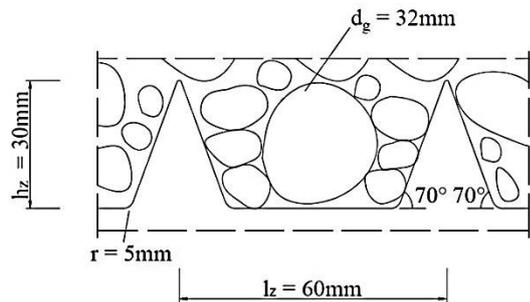


Abb. 2.17: Optimierte Zahngeometrie nach (Schmid 2000)

Die durch Schmid entwickelte Zahngeometrie wird von Tandler (2013) experimentell und numerisch untersucht, das Vorbemessungskonzept von Schmid bestätigt und erweitert.

Zahnleistenpaar mit Vergussmörtel

In der Arbeit von Dehlinger (2004) wird die Kraftübertragung zwischen zwei Stahlelementen mittels einer Vergussfuge untersucht. Dafür werden die Stahlelemente mit einer Verzahnung konstruiert, welche die Kräfte von einem Stahlelement über die Mörtelfuge zum anderen Stahlelement leitet. Aufgrund der Verzahnung wird diese Verbindung auch als Zahnleiste bzw. Zahnleistenpaar mit Vergussmörtel bezeichnet. Durch die Mörtelfuge können Toleranzen problemlos ausgeglichen werden. Damit das Versatzmaß möglichst klein ist, sollte die Dicke t_F der Mörtelfuge so gering wie möglich hergestellt werden. Ein Verguss erfordert i.d.R. eine Verarbeitung vor Ort, was hinsichtlich des Mischungsverhältnisses und der Witterung (Luftfeuchte und Temperatur) ein Risiko für die Qualität des Bauwerks bedeutet.

2.3 Anforderungen an modulare Verbindungen

2.3.1 Studien zum Lastansatz

Studie zur erforderlichen Tragfähigkeit von Konsolen und Trägeranschlüssen

Konsolen werden im Hochbau für Wohngebäude, Bürogebäude und im Industriebau eingesetzt. Kranbahnen laufen meist immer auf Konsolen. In einer Studie werden für die genannten Bereiche allgemeine Konsolenlasten ermittelt. Auf dieser Grundlage kann das Spektrum der erforderlichen Traglast der Konsole abgeschätzt werden. Für die Wohn- und Bürogebäude wird eine Stahlbetondecke mit 20 cm Dicke zugrunde gelegt. Aus Stützenabstand und Deckenspannweite ergibt sich die Lasteinzugsfläche. Dabei werden für den Wohnungs- und Bürobau gängige Stützenabstände von 4-8m sowie Deckenspannweiten von 8-14m berücksichtigt. Beim Industriebau wird die Eigenlast mit 5,0; 7,5 und 15 kN/m² angesetzt. Damit soll das erhöhte Eigengewicht von zum Beispiel π -Decken berücksichtigt sein. In jeder Berechnung ist weiterhin eine Ausbaulast von 1 kN/m² enthalten.

Tab. 2.2: Parameter zur Studie zu den Konsollasten

Bezeichnung	Gebäude	Deckenspannweite [m]	Stützenabstand [m]	q_k/Q_k [kN/m ² bzw. kN]	Lasteinzug [m ²]	Konsollenlast P_d [kN]
SKL 1a	Wohngebäude a	8	4	1,5	16	165
SKL 1b	Wohngebäude b	8	6	1,5	24	250
SKL 1c	Wohngebäude c	8	8	1,5	32	330
SKL 2a	Bürogebäude a	10	8	3	40	500
SKL 2b	Bürogebäude b	12	8	3	48	600
SKL 2c	Bürogebäude c	14	8	3	56	700
SKL 3a	Industriebau a	14	8	5	56	870
SKL 3b	Industriebau b	14	8	5	56	1050
SKL 3c	Industriebau c	14	8	10	56	2050
SKL 4a	Kranbahn a	-	-	100	-	200
SKL 4b	Kranbahn b	-	-	200	-	400
SKL 4c	Kranbahn c	-	-	300	-	600

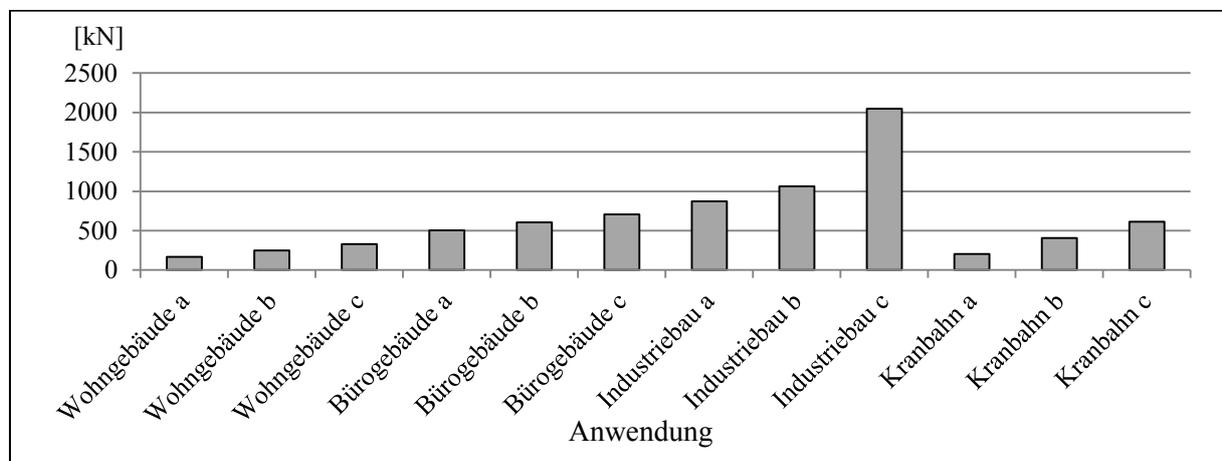
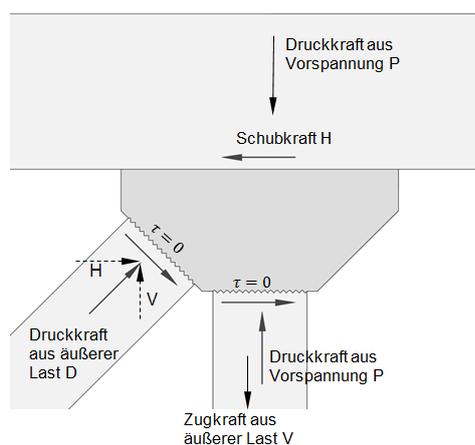


Abb. 2.18: Konsollasten in Abhängigkeit der Anwendung im Überblick

Studie zur Belastung am Fachwerkknoten



Im Forschungsbericht (Falter et. al. 2018) wird ein 60 m weit spannender modularer Fachwerkträger entwickelt. Dieser wird dreidimensional als Stabwerk abgebildet und als Einzelträger sowie als gesamtes Dachtragwerk berechnet. Die Druckkraft in der maximal belasteten Druckdiagonale beträgt 1120 kN. Da die Diagonale unter 45° verläuft, ergibt sich eine Horizontalkraft in der Schubfuge von 792 kN.

Abb. 2.19 Knotenpunkt des modularen Fachwerkträgers

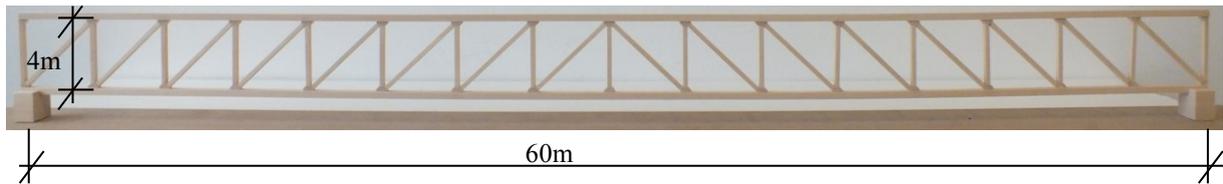


Abb. 2.20: Modell eines 60m langen Fachwerkträgers

2.3.2 Technische und baubetriebliche Anforderungen

Es wird eine Verbindung entwickelt, mit der stabförmige Stahlbetonfertigteile gefügt und große Kräfte übertragen werden können. An diese Verbindung werden technische und baubetriebliche Anforderungen gestellt.

Die Verbindung soll in unterschiedlichen Anschlusssituationen eingesetzt werden können und einen hohen Vorfertigungsgrad der Elemente ermöglichen. Es sollen eine einfache Herstellung und ein platzsparender Transport der Stahlbetonbauteile möglich sein. Die Montage und Demontage aller Elemente muss effizient ausgeführt werden können. Die Fügung der einzelnen Bauteile erfolgt über zwei Stahleinbauteile mit gezahnten Kontaktflächen die trocken – ohne Verguss – die Kräfte von einem zum anderen Bauteil übertragen. Somit kann auf die Verwendung eines Vergussmörtels verzichtet werden. Da eine gleichbleibende Qualität von Vergussmörteln auf der Baustelle aufgrund von unterschiedlichen Witterungseinflüssen und Baustellenpersonal nur schwer erreicht werden kann, liegt ein großer Vorteil bei der Ausführung mit trockener Fuge.

Weiterhin wird die Verbindung so konstruiert, dass ein Toleranzausgleich vorgenommen werden kann.

Zum Anforderungsprofil zählen auch die Übertragung von hohen Kräften, eine hohe Dauerhaftigkeit und die Berücksichtigung von Brandschutzanforderungen.

Die Verbindung soll ein möglichst schlankes Tragwerk ermöglichen. Dabei sollen auch die Anschlussdetails mit möglichst kleinen Bauteilquerschnitten konstruiert werden.

2.4 Toleranzbetrachtung modularer Verbindungen

2.4.1 Toleranzausgleich

In Querrichtung können sich die Zähne zunächst frei verschieben, womit eine Ausgleichsmöglichkeit besteht (Abb. 2.21). Im verschobenen Zustand muss noch eine ausreichende Kontaktfläche zur Kraftübertragung vorhanden sein. Deshalb ist es sinnvoll die Zahnbreite b_z mit einem Zusatzmaß Δb_z auszuführen, dass zum Toleranzausgleich in Querrichtung verwendet werden kann.

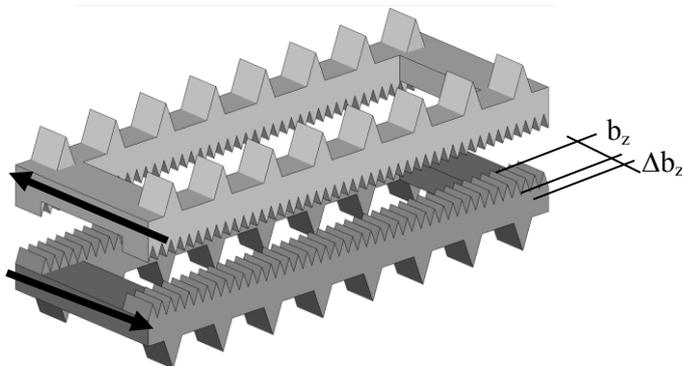


Abb. 2.21: Toleranzausgleich in Querrichtung am Beispiel der Stahlverzahnung nach (Hofmann 2015)

In Längsrichtung kann ein Toleranzausgleich durch ein Versetzen der Verzahnung erfolgen (Abb. 2.22). Dabei können beide anzuschließenden Bauteile in die erforderliche Lage gebracht werden. Die Genauigkeit dieses Toleranzausgleichs ist abhängig von der Länge des Zahngrunds l_z . Je kleiner die Verzahnung ist, desto exakter können die Bauteile platziert werden.

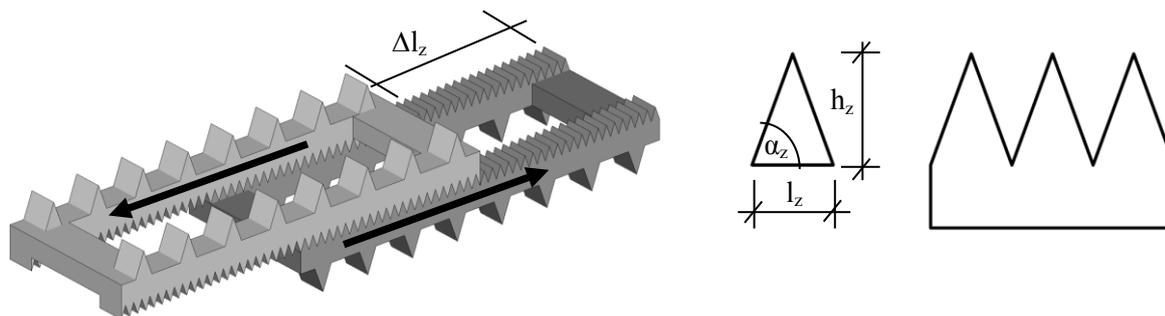


Abb. 2.22: Weit versetzt dargestellter Längsversatz zweier Verzahnungen am Beispiel der Stahlverzahnung nach (Hofmann 2015)

Das maximale Toleranzmaß kann anhand von zwei Fällen betrachtet werden (Abb. 2.23). Im besten Fall werden die Verzahnungen in Längsrichtung so versetzt, dass beide Bauteile exakt passen. Im schlechtesten Fall werden die Verzahnungen soweit versetzt, dass an der gewünschten Lage der Bauteile die Zähne genau mit den Zahnspitzen aufeinandertreffen. An dieser Stelle müssen die Bauteile um einen halben Zahn in die eine oder andere Richtung versetzt werden. Somit kann die Genauigkeit auf $0,5 \cdot l_z$ festgelegt werden. Um bei einem Versetzen der Verzahnungen in Längsrichtung weiterhin eine volle Kraftübertragung zu ermöglichen, werden diese mit einer Überlänge Δl_z (Abb. 2.22) hergestellt. Sind die Zähne für die Bemessung maßgebend, so muss die Anzahl der kraftübertragenden Zähne genau definiert sein. Um trotzdem die geforderte Überlänge realisieren zu können, wird eine Kontaktseite mit einer durchgängigen Verzahnung, die andere nur mit der erforderlichen Zahnanzahl ausgeführt. Somit können die Verzahnungen ohne Verminderung der Kraftübertragung versetzt werden.

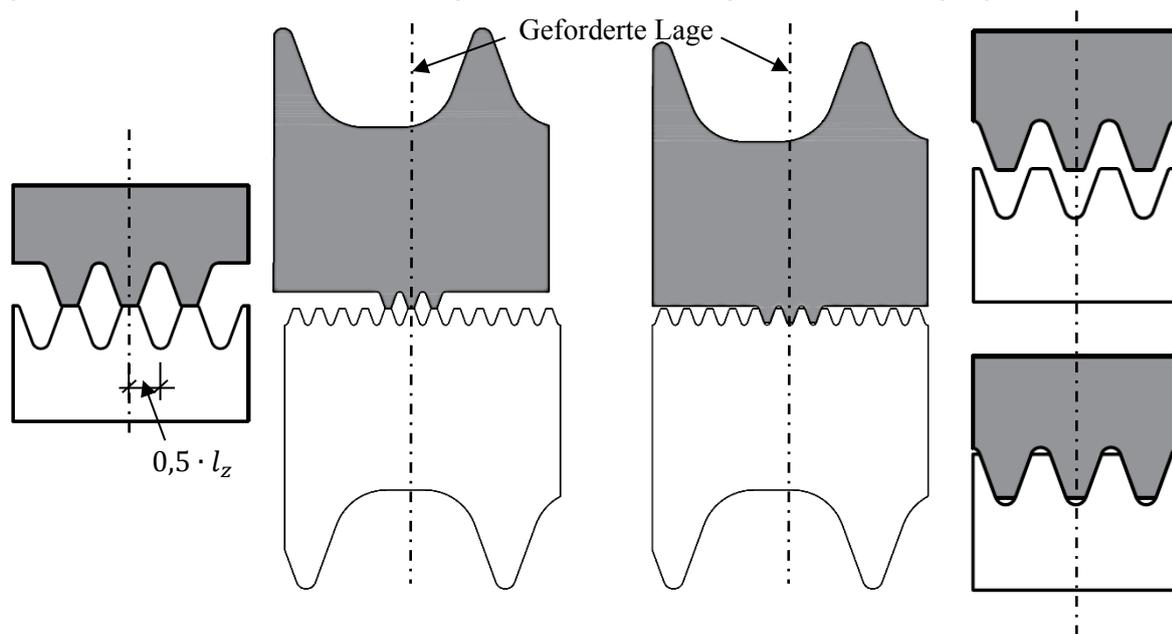


Abb. 2.23: Auszug aus zwei horizontal aufeinanderliegenden Zahnleisten: schlechtester Fall (links) und bester Fall (rechts) der Zahnverbindung im Vergleich

2.4.2 Herstelltoleranzen von Stahlzähnen

Herstellverfahren

Neben den für die Konstruktion notwendigen Toleranzen sowie deren Auswirkungen und Ausgleichsmöglichkeiten wird im Folgenden betrachtet, ob diese Anforderungen im Fertigungsprozess umgesetzt werden können.

Schneidverfahren:

Zur Fertigung einer Zahnleiste können die Schneidverfahren Wasserstrahlschneiden, Plasmaschneiden und Laserschneiden angewandt werden. Hierbei wird aus einem Rohstahl mit der Dicke a die Zahnleiste geometrie herausgeschnitten. Die Herstellung der Bauteile erfolgt i. d. R. stückweise. Je nach

Verfahren sind die maximale Dicke des bearbeiteten Werkstoffes, die Bearbeitungsgeschwindigkeit, die Toleranzen, die Qualität des bearbeiteten Schnittes sowie der Einfluss durch die im Bearbeitungs-gang eingetragene Wärme in das Werkstück zu berücksichtigen.

Das Wasserstrahlschneiden kann bis zu einer Materialdicke von 300 mm (Tab. 2.3) eingesetzt werden und erfolgt ohne einen Wärmeeintrag in das Bauteil, womit Änderungen in der Molekularstruktur des Stahls vermieden werden. Als Nachteil kann hierbei die geringe Bearbeitungsgeschwindigkeit genannt werden.

Ein Vorteil beim Plasma- und Laserschneiden ist die Bearbeitungsgeschwindigkeit. Beim Laserschneiden sind sehr geringe Toleranzen möglich, allerdings ist die Materialdicke auf relativ dünne Bleche (20 mm) begrenzt. Größere Materialdicken können beim Plasmaschneiden verwendet werden. Bei diesem Verfahren sind die Toleranzabweichungen jedoch am größten. Ein Wärmeeintrag erfolgt beim Plasma- und Laserschneiden. Dieser kann sich nachteilig auf die Festigkeit des Stahls auswirken und ungewollte Nebenspannungen hervorrufen.

Für die Herstellung der Prüfkörper wird das Wasserstrahlschneiden angewendet, da hierbei die erforderlichen Dicken zwischen 30 und 50 mm mit einer relativ geringen Toleranz ausgeführt werden können. Die Abweichungen sind bei den verwendeten Prüfkörpern geringer als die nach Norm (DIN EN ISO 9013) geforderten Toleranzen (vgl. Kap. 3.8.1 und Anhang F).

Tab. 2.3: Gegenüberstellung der Schneidverfahren (Al-Sabah 2016)

	Wasserstrahlschneiden	Plasmaschneiden	Laserschneiden
Schneidmethode	Abtragen	Schmelzen und Blasen	Schmelzen und Blasen
Maximale Dicke [mm]	300	60	20
Geschwindigkeit [mm/s]	2-12	4-600	1,5-300
Toleranzen [mm je 1mm Blechdicke]	0,05-0,2 (50-200 μ m)	0,25-0,4 (250-400 μ m)	0,025-0,08 (25-80 μ m)
Schrägwinkel [°]	1	Bis zu 5	1
Schneidqualität	Sehr gut	Gut	Sehr gut
Schnittbreite [mm]	0,5-1,3	1,5-2	0,7-1,5
Schlacke am Schnittfugenrand	Keine	Klein, kann kontrolliert werden	Klein, kann kontrolliert werden
Wärmeeinflusszone HAZ	Kein Einfluss	Großer Einfluss	Einfluss < als Plasma

Fräsen:

Eine weitere Herstellungsmöglichkeit ist das Fräsen. Hierbei handelt es sich nicht um einen Schneidprozess sondern um einen Zerspanungsprozess. Der Fräskopf weist dabei die erforderliche Geometrie auf. Durch das Abtragen der Späne durch den rotierenden Fräskopf erhält das Werkstück die gewünschte Form. Für die Zahnleiste ist somit eine Fräsergeometrie für die betonseitige große Stahlverzahnung und eine weitere für die feine Stahlverzahnung erforderlich. Ein dritter Fräser bearbeitet ebene Flächen der Zahnleiste. Die Bearbeitung ist für eine geringe Fertigungsanzahl sehr teuer, da die Fräser extra für die gewünschten Bauteile hergestellt werden müssen. Deshalb wird im Rahmen der Prüfkörperherstellung auf diese Möglichkeit verzichtet. Für ein Produkt, welches in großer Stückzahl gefertigt wird, ist es jedoch eine sinnvolle Fertigung. Die Zahnleiste wird hierbei nicht als einzelnes Stück gefertigt. Das Blech wird auf eine beliebige Länge mit den Verzahnungsgeometrien versehen und im Nachgang auf beliebige Breiten gesägt. Damit besteht eine große Flexibilität der Zahnleistenbreite bei gleichbleibender Fertigungsgenauigkeit. Mit Vollhartmetallfräsern, als Nutfräßer eingesetzt, können die geforderten Geometrien mit einer Genauigkeit von 0,01mm hergestellt werden (Kapp Nil-es 2018).

Fertigung der Stahleinbauteile mit Wasserstrahlschneiden

Der Prototyp, die gezahnten Stahlprismen sowie die Zahnleisten der Konsolen und Knotenpunkte werden mit abrasiven Wasserstrahlschneiden hergestellt (Abb. 2.24).

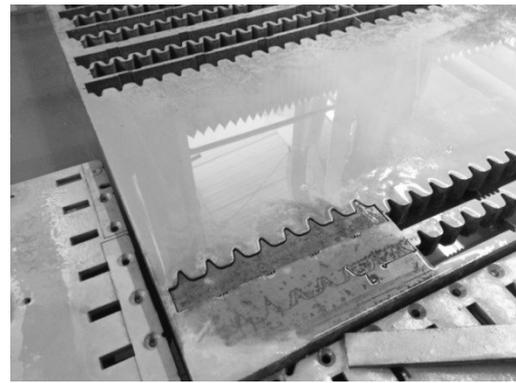
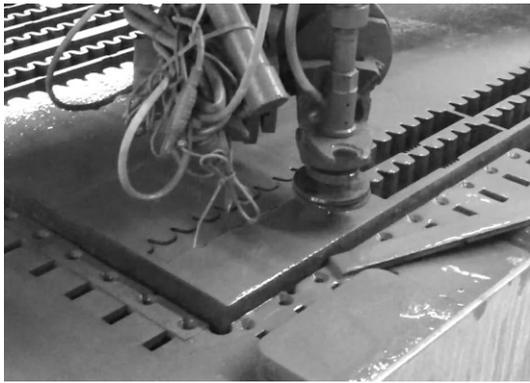


Abb. 2.24: Fotografie aus dem Fertigungsprozess der Zahnleisten (Wasserstrahlschneiden) (AquaContour GmbH 2017)

Die Maschine erhält die zu fertigende Kontur über eine Eingabedatei aus einem CAD-Programm. Der Wasserstrahl trifft über einen Schneidkopf mit Düse auf einer Seite des Werkstückes auf und durchdringt dieses. Das Werkstück bremst den Wasserstrahl, wodurch dieser mit zunehmender Bauteildicke immer weiter „nachläuft“. Der Wasserstrahl verläuft somit über einen Winkel und führt zu einem Differenzmaß Δ (Abb. 2.25). Die zulässigen Toleranzen sind in der (DIN EN ISO 9013) festgelegt.

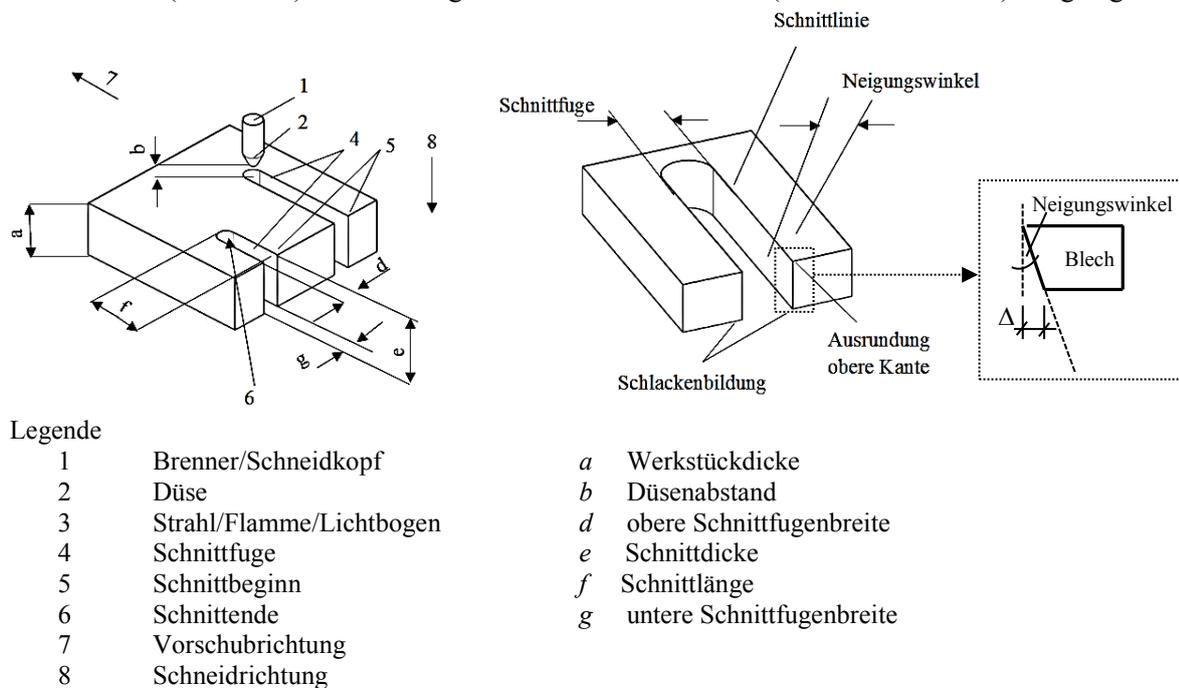


Abb. 2.25: Bezeichnungen beim Wasserstrahlschneiden nach (DIN EN ISO 9013)

Somit differiert die Schnittdicke e zwischen der Wassereintritts- und der Wasseraustrittsseite. Im Allgemeinen ist die Genauigkeit auf der Wassereintrittsseite höher (Abb. 2.26).

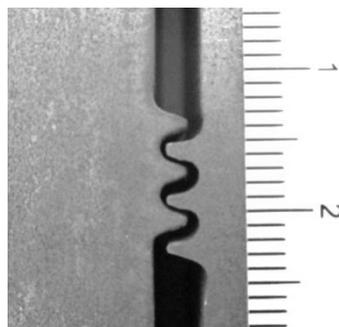
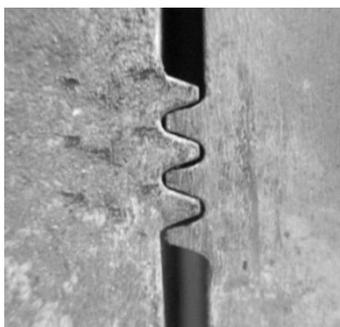


Abb. 2.26: Links: Wassereintrittsseite; rechts: Wasseraustrittsseite

2.5 Konzeptentwurf des Stahleinbauteils

2.5.1 Zahnleiste beidseitig in Ortbeton

Ausgangssituation für die Verbindung ist die im Ortbeton eingelassene Zahnleiste, wie sie von Schlaich (1992) bei Brücken einsetzt und von Schmid (2000) hinsichtlich der Geometrie optimiert wird. Mit dieser Zahnleiste können lokal große Kräfte in den Konstruktionsbeton eingeleitet werden. Die Kraftübertragung erfolgt dabei immer zwischen einem Ortbeton und einem Stahlbauteil. Die Zahnleiste soll nun für eine Kraftübertragung zwischen zwei Stahlbetonfertigteilen genutzt werden. Dabei stützen sich die Betondruckstreben an den Stahlzähnen ab, wodurch eine Lastkonzentration im Bereich der Zahnleiste erfolgt. Die Zahnleiste nimmt die Kräfte auf und leitet diese in das anschließende Bauteil weiter (Abb. 2.27).

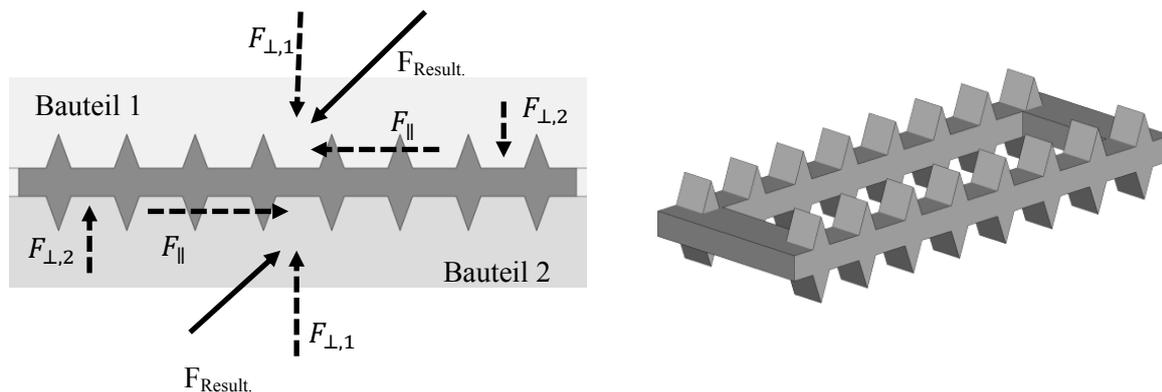


Abb. 2.27: Im Ortbeton eingelassene Zahnleiste

Um die Zahnleiste für modulare Verbindungen zwischen Betonbauteilen nutzen zu können, wird diese weiterentwickelt.

2.5.2 Zahnleiste mit Vergussfuge

Da eine modulare Fügung der Bauteile erforderlich ist, müssen an der Kontaktfläche zwei Stahlbauteile aufeinander treffen. Im zweiten Schritt werden zwei Zahnleisten verwendet, die zur Betonseite weiterhin die betonseitigen großen Stahlzähne besitzen, zueinander jedoch über feine Stahlzähne die Kräfte von einer zur anderen Zahnleiste übertragen können. Zwischen den Zahnleisten wird eine Vergussfuge verwendet. Es muss somit ein planmäßiger Spalt zwischen den Leisten gelassen werden, welcher im Nachgang mittels selbstverdichtenden Vergussmörtel ausgefüllt wird (Abb. 2.28). Somit können Toleranzen einfach ausgeglichen werden.

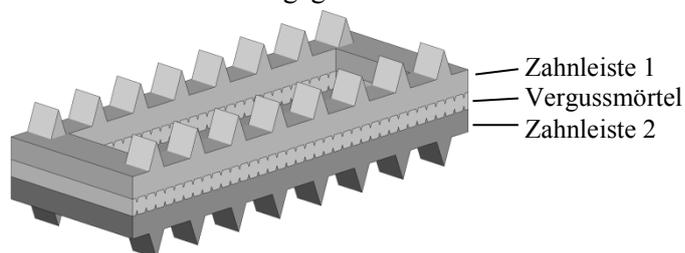


Abb.2.28: Zahnleisten mit Vergussfuge

Die Dicke der Mörtelfuge t_F sollte so klein wie möglich ausgeführt werden, um die Ausmitte möglichst gering zu halten, jedoch so groß wie es nötig ist, um alle Ungenauigkeiten auszugleichen (Dehlinger 2004). Wenn der Vergussmörtel vor Ort gemischt wird, entsteht zudem das Risiko, dass das Mischungsverhältnis nicht exakt eingehalten wird. Weiterhin spielt die Witterung eine große Rolle, die die Qualität des gesamten Bauwerks ebenfalls reduzieren kann. Daher sind bei dieser Ausführungsvariante strenge Kontrollen während aller Arbeitsschritte notwendig, um die Schubkraftübertra-

gung gewährleisten zu können. Diese Fügungsmethode entspricht nicht vollständig einer modularen Verbindung, da hier der zerstörungsfreie Rückbau nicht möglich ist.

2.5.3 Zahnleiste mit feiner Stahlverzahnung

Um auf eine Betondecke bzw. Vergussfuge vor Ort zu verzichten und somit eine trockene Fuge ausführen zu können, wird im weiteren Schritt die Vergussfuge weggelassen und ein direkter Kontakt zwischen den Stahlzähnen hergestellt (Abb. 2.29).

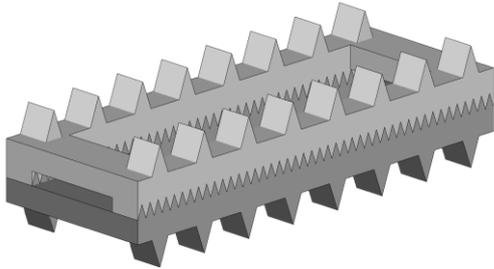


Abb. 2.29: Zahnleisten mit Stahl-Stahl-Verzahnung

Dazu wird auf der Betondecke die von Schlaich (1992), Schmid (2000) und Tandler (2013) entwickelte betonseitige große Stahlverzahnung eingesetzt, welche die Kräfte aus dem Beton in die Zahnleiste einleitet. Auf der gegenüberliegenden Seite ist die im Kapitel 3 entwickelte feine Stahlverzahnung, welche die Kräfte von einem Bauteil zum anderen überträgt, angeordnet (Abb. 2.30).

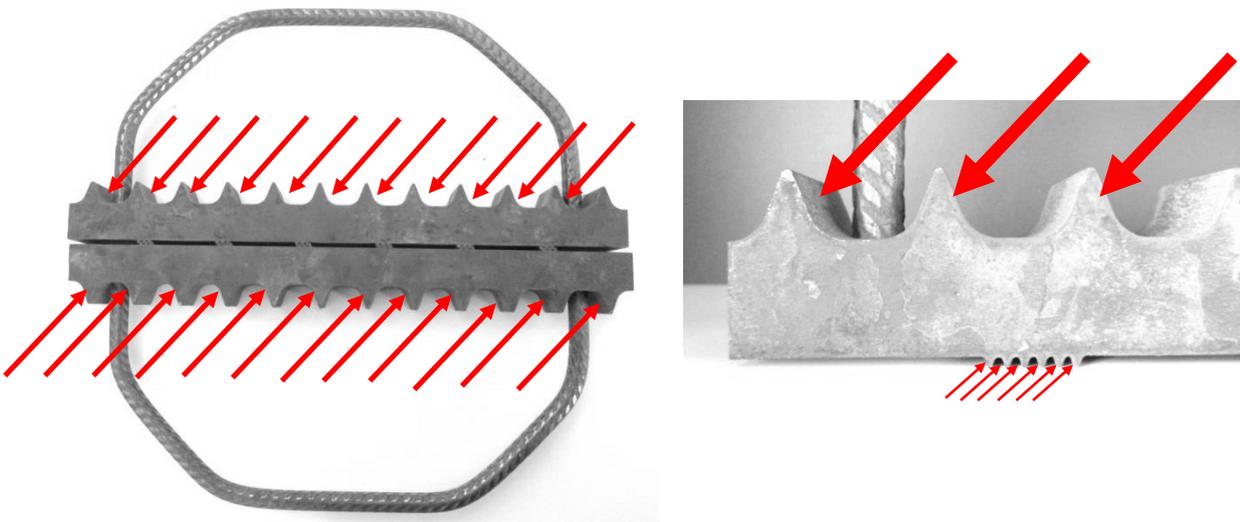


Abb. 2.30: Prototyp der Zahnleiste (Schmidt 2018)

Dieses Verbindungskonzept ist die Grundlage für die modulare Verbindung, welche in den folgenden Kapiteln untersucht wird.

3. Entwicklung der Stahlzahngeometrie

3.1 Ziel und Vorgehensweise

Es wird eine Zahngeometrie entwickelt, welche die in Kapitel 2 aufgeführten Anforderungen an die Verbindung erfüllen. Um die Anwendung möglichst vielschichtig zu gestalten, wird die Geometrie unabhängig von der Krafrichtung entworfen. Zunächst werden grundlegende Überlegungen zur Zahnhöhe und Neigung der Zahnflanken gemacht. Darauf aufbauend werden verschiedene Zahngeometrien konstruiert und die Spannungsverteilung an einem Zahnleistenpaar mit der Finite-Element-Methode (FEM) physikalisch linear sowie nichtlinear und geometrisch nichtlinear mit dem Computerprogramm Ansys simuliert. Auf Grundlage dieser Ergebnisse wird eine Geometrie festgelegt, welche weiter optimiert wird. Um Spannungsspitzen und damit einhergehende Rissbildungen im Zahngrund zu minimieren, wird eine Parameterstudie zu den Zahngrundradien durchgeführt. Aus den gesammelten Erkenntnissen wird eine Zahngeometrie abgeleitet, die in experimentellen Versuchen untersucht wird.

3.2 Maschinenelemente als Grundlage für Stahlverzahnungen

Im Maschinenbau werden Stahlverzahnungen beispielsweise für Zahnräder und Zahnstangen sowie in Gewinden eingesetzt. Es werden bereits im Maschinenbau etablierte Elemente auf deren Anwendbarkeit und Adaption untersucht.

Zahnräder und Zahnstangen

Zahnräder (Abb. 3.1) sind so konzipiert, dass immer nur ein Zahn je Element für die Kraftübertragung verantwortlich ist. Die Zähne werden dabei mit einer gekrümmten Oberfläche ausgeführt. Da hierbei immer ein punktueller bzw. linienförmiger Kontakt entsteht, liegt eine Hertz'sche Pressung vor. Die Nachweisführung der Zahnradhersteller erfolgt über die Zahnfußtragfähigkeit und die Grübchentragsfähigkeit (Muhs et. al. 2007).



Abb. 3.1: Zahnrad

Jeder Zahn besitzt eine Arbeits- und eine Rückflanke. Die Geometrie der Zähne muss ein Eingreifen des gegenüberliegenden Zahns ermöglichen, wobei sich die Zähne aufeinander abwälzen (Abb. 3.2). Diese wandern entlang der Arbeitsflanke (Muhs et. al. 2007; S.674). Eine Zahnstange verhält sich hinsichtlich der Geometrie ähnlich, nur dass hier das Rad auf einer geraden Verzahnung verläuft.

Die gebräuchlichsten Zahngeometrien sind die Evolventenverzahnung und die Zykloidenverzahnung. Ferner gibt es noch die Triebstockverzahnung, welche einen Sonderfall der Zykloidenverzahnung darstellt, sowie die Wildhaber-Novikov-Verzahnung (Muhs et. al. 2007; S.679 – 685). Alle Verzahnungen besitzen die beschriebene konvexe Form, weshalb eine direkte Adaption nicht als sinnvoll erachtet wird.

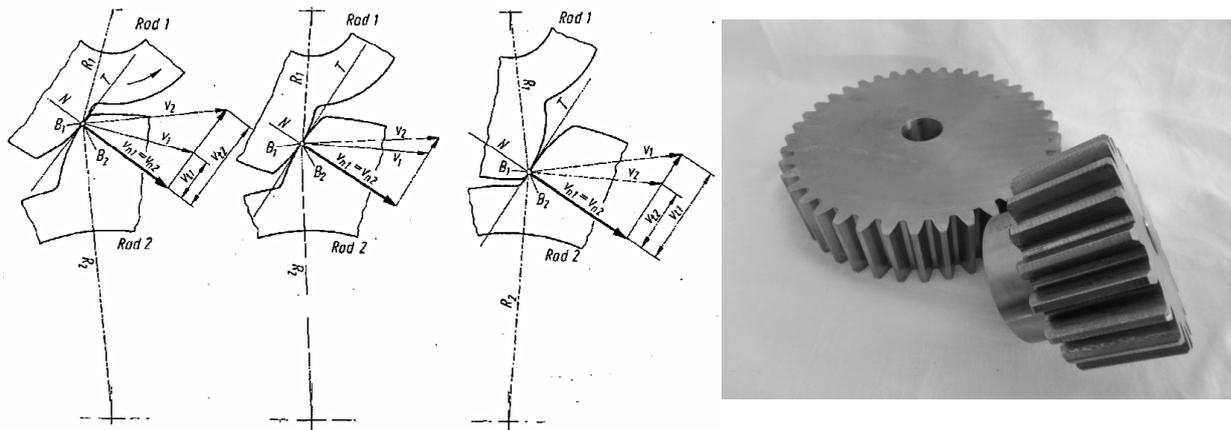


Abb. 3.2: Zähne gleiten aufeinander (Ettmeyer 2007; S. 3.02); Zahnrad (HolTech GmbH & Co. KG 2017)

Hirth-Verzahnung

Die Hirth-Verzahnung (Abb. 3.3) ist eine axial wirksame, planseitige Verzahnung. Sie gehört im Maschinenbau zu den formschlüssigen Verbindungen von Welle und Welle und zählt somit zu den festen aber lösbaren Kupplungen (Albers et al. 2007; S. 295). Durch die flach aneinander liegenden Zahnflanken sowie der Zahnneigung ist die Hirth-Verbindung mit der hier zu entwickelnden kleinmasstäblichen Stahlverzahnung vergleichbar.



Abb. 3.3: Beispiele von Hirth – Verzahnungen (Voith GmbH: 2016)

Gewinde

Die Grundformen der Gewinde sind das metrische Gewinde, das metrische Feingewinde, das Whitworth-Rohrgewinde, das Trapez- und Sägewinde sowie das Rundgewinde.

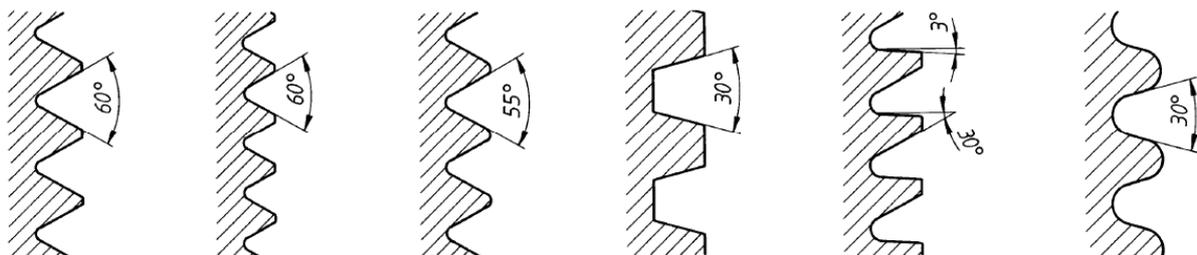


Abb. 3.4: metrische Gewinde, metrische Feingewinde, Whitworth-Rohrgewinde, Trapezgewinde, Sägewinde, Rundgewinde (Muhs et. al.: 2007; S.218)

Gewinde haben im Gegensatz zum klassischen Zahnrad ebene Flanken und entsprechen daher besser dem Anwendungsgebiet der statischen Verzahnung. Die Gewinde werden unter dem Gesichtspunkt

betrachtet, welche Toleranzen mit den jeweiligen Geometrien ausgeglichen werden können. Ferner ist die Tragfähigkeit des Zahns von der Zahngrundfläche abhängig. Der Formschluss wiederum wird maßgeblich von der Zahnhöhe und die Kraftübertragung am Zahnkontakt von der Zahnneigung bestimmt. Um diese Kriterien zu erfüllen, stellt das Trapezgewinde sowie das Whitworthgewinde die geeignetste Geometrie dar.

Tab. 3.1: Differenzierung der Maschinenelemente

Bezeichnung	Beanspruchungsart	Kontakt	Verbindung	Kraftabtragung
Zahnräder	dynamisch	punktuell	formschlüssig	über Einzelzahn
Hirth – Verzahnung	statisch	flächig	formschlüssig	über mehrere Zähne
Gewinde	statisch	flächig	kraftschlüssig	über mehrere Zähne
Zahnleiste	dynamisch	punktuell	formschlüssig	über Einzelzahn

3.3 Grundlagen zur Betrachtung von Singularitäten

Allgemeines

Bei der Analyse von Verzahnungen ist die Betrachtung von Singularitäten von entscheidender Bedeutung. Verzahnungen übertragen die Kräfte über Kontaktpressungen. Dabei können Spannungsspitzen im Kontaktbereich entstehen, die auf das Phänomen der Hertz'schen Pressungen zurückzuführen sind. Dies ist insbesondere von der Zahngeometrie abhängig. Eine weitere Singularitätsstelle ist die Zahngrundausrundung. Diese stellt eine Kerbe im Bauteil dar und führt zu Spannungsspitzen. Diese können zu Schäden am Bauteil durch Rissentwicklung führen.

Hertz'sche Pressungen

Bei der punkt- oder linienförmigen Berührung zweier Festkörper treten hohe lokale Pressungen auf. Diese werden Hertz'sche Pressungen genannt. Der Ansatz geht dabei von linear-elastischen Materialverhalten und reibungsfreien Kontakt aus. Beim Punktkontakt, wie beispielsweise beim Kugel-Kugel-Kontakt oder beim Kugel-Ebene-Kontakt, wird von einer sehr kleinen Kontaktfläche ausgegangen. Ebenso wird bei der linienförmigen Berührung (z. B. Zylinder-Zylinder-Kontakt, Zylinder-Ebene-Kontakt) eine sehr kleine Breite der Kontaktfläche zugrunde gelegt. Diese Kontaktfläche wird als Abplattung mit der Breite $2a$ und der Länge b bezeichnet. Es wird davon ausgegangen, dass sich beide Festkörper um das Maß Δ annähern (Abb. 3.5). Das Maß a ist abhängig von der Kontaktfläche, dem Elastizitätsmodul und dem Radius der aufeinander treffenden Festkörper. Die Kraft trifft unter einem Winkel von 90° auf die Berührfläche und führt zur zentrischen Druckspannung σ_0 . In der Berührfläche werden Schubspannungen vernachlässigt. Weiterhin wird von einem gleichen Elastizitätsmodul beider Festkörper ausgegangen.

Exemplarisch beträgt die Kontaktfläche beim Zylinder-Ebene-Kontakt $2a \cdot b$. Die Hertz'sche Pressung kann analytisch berechnet werden. Für den genannten Fall gilt:

$$a = 1,520 \cdot \sqrt{\frac{F \cdot r}{b \cdot E}} \quad (\text{Gl. 3.1})$$

$$\sigma_0 = 0,418 \cdot \sqrt{\frac{F \cdot E}{b \cdot r}} \quad (\text{Gl. 3.2})$$

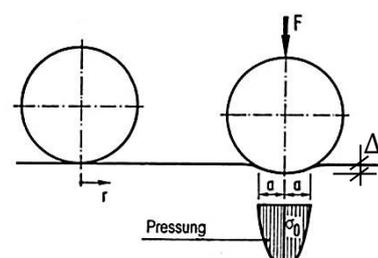


Abb. 3.5: Kontakt Zylinder auf Ebene nach (Petersen 2013, S. 1128)

Dabei ist F die einwirkende Kraft, r der Radius des Zylinders, b die Länge der Kontaktfläche und E das Elastizitätsmodul des Materials.

Für weitere Anwendungsfälle wird auf Petersen (2013) und Muhs et al. (2007) verwiesen. Hintergrundinformationen können Hertz (1881) entnommen werden.

Spannungen in gekerbten Bauteilen (Neuber)

Im Maschinenbau wird bei einem durch Zugspannungen beanspruchtes gekerbtes Bauteil von Kerbspannungen gesprochen (Arntz et al. 1984, S. 364). Das Spannungsmaximum σ_{max} befindet sich in der Kerbspitze. Der Spannungskerbfaktor α_σ gibt das Verhältnis zwischen dem Spannungsmaximum und der Spannung im Bauteil σ_n an. Analog gilt dies für die Dehnungen. Hier ist α_ε der Dehnungsfaktor.

$$\alpha_\sigma = \frac{\sigma_{max}}{\sigma_n} \quad (Gl. 3.3)$$

$$\alpha_\varepsilon = \frac{\varepsilon_{max}}{\varepsilon_n} \quad (Gl. 3.4)$$

Wird in der Kerbe die Streckgrenze überschritten, so kommt es zu lokalen Plastifizierungen und damit zu einem Spannungsausgleich in Kerbnähe. In Neuber (1968, S. 245) wird dieses Verhalten als Makrostützwirkung bezeichnet. Um aus den Spannungen einer linear-elastischen Berechnung auf die Plastischen Spannungen und den dazugehörigen Dehnungen zu schließen, entwickelt Neuber eine Formel. Dazu wird ein Hooke'scher Kerbfaktor α_H eingeführt.

$$\alpha_H = \frac{\dot{\sigma}_{max}}{\dot{\sigma}_n} \quad (Gl. 3.5)$$

Mit:

$\dot{\sigma}_{max}$ = Maximale Hooke'sche Ersatzspannung im Kerbbereich (Abb. 3.6 rechts)

$\dot{\sigma}_n$ = Hooke'sche Ersatzspannung im Bauteil (Abb. 3.6 rechts)

Dabei wird $\dot{\sigma}_{max}$ direkt an der Kerbe berechnet. Beim einfachen gekerbten Zugstab entspricht $\dot{\sigma}_n$ der Spannung aus F/A ohne den Einfluss der Kerbe (vgl. Muhs et. al. 2007). Um die Spannungen bei komplexeren Bauteilen zu berechnen, kann die FE-Analyse mit und ohne Kerbe erfolgen.

Der Spannungskerbfaktor α_σ und der Hooke'sche Kerbfaktor α_H werden in Beziehung gebracht:

$$\alpha_\sigma \cdot \alpha_\varepsilon = \alpha_H^2 \quad (Gl. 3.6)$$

Die linear-elastischen Spannungen werden entsprechend des Hooks'schen Gesetz

$$\sigma = \varepsilon * E \quad (Gl. 3.7)$$

berechnet und als $\dot{\sigma}_n$ und $\dot{\sigma}_{max}$ an der Hooke'schen Geraden angetragen. Durch diese Spannungspunkte wird die Neuber-Hyperbel gezeichnet.

$$\sigma_n \cdot \varepsilon_n = \frac{\dot{\sigma}_n^2}{E} \quad (Gl. 3.8) \quad \text{bzw.} \quad \sigma_{max} \cdot \varepsilon_{max} = \frac{\dot{\sigma}_{max}^2}{E} \quad (Gl. 3.9)$$

Diese schneidet die Arbeitslinie des Werkstoffes $\sigma_{pl}(\varepsilon)$ an den Stellen σ_{max} und σ_n , an denen ebenfalls die dazugehörige Dehnung abgelesen werden kann. Die Arbeitslinie kann dabei bilinear oder multilinear sein. Somit ist es möglich, die Spannungs- und Dehnungswerte im plastischen Bereich aus einer linear-elastischen Berechnung zu erhalten (Abb. 3.6).

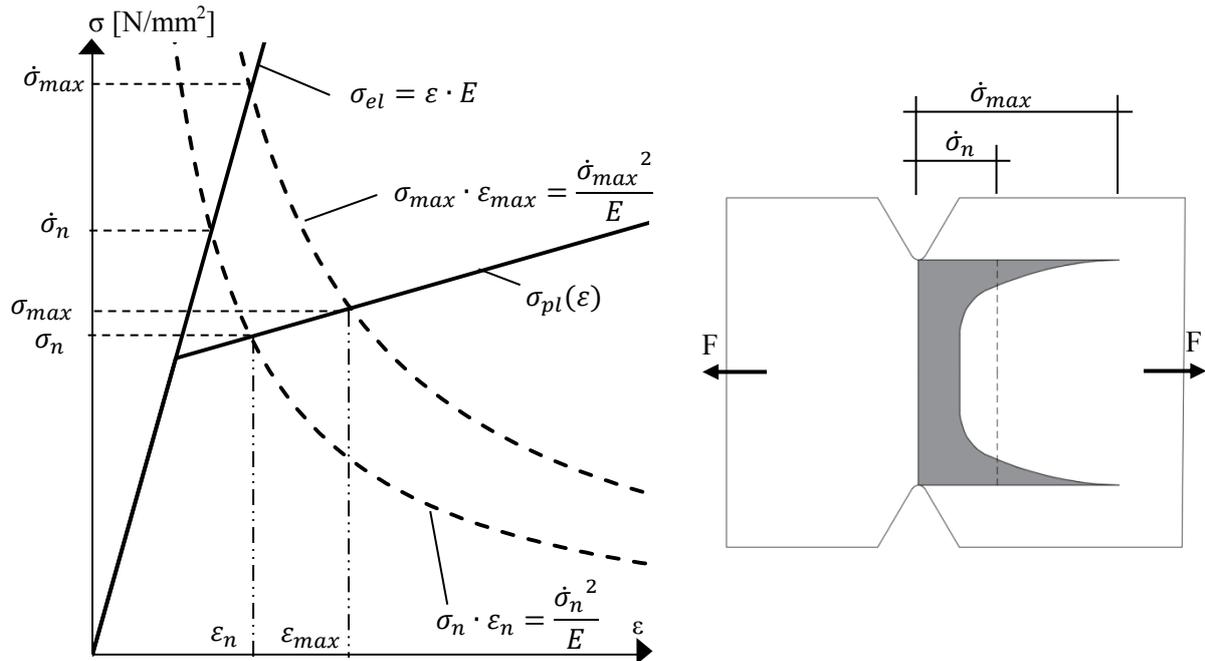


Abb. 3.6: Grafische Darstellung der Neuber-Hyperbel (links); Darstellung der Spannungen am einfachen zugbelasteten Bauteil

3.4 Grundlegende Überlegungen zur Stahlzahngeometrie

Überlegungen zur Zahnhöhe und Neigung

Die festzulegenden Parameter einer Verzahnung sind die Zahnhöhe h_z und die Neigung der Zahnflanken α_z . Daraus ergibt sich das Zahngrundmaß l_z . Das Zahngrundmaß soll möglichst klein gehalten werden, da hiervon die Toleranz abhängt. Gleichzeitig soll eine möglichst hohe Zahnhöhe erreicht werden, um im Falle einer Fugenöffnung die Kraftübertragung noch sicherzustellen. Die Stahlverzahnung wird im ersten Schritt mit einer Zahnhöhe 5mm und einer Zahnneigung $\alpha_z = 70^\circ$ konstruiert (Abb. 3.7).

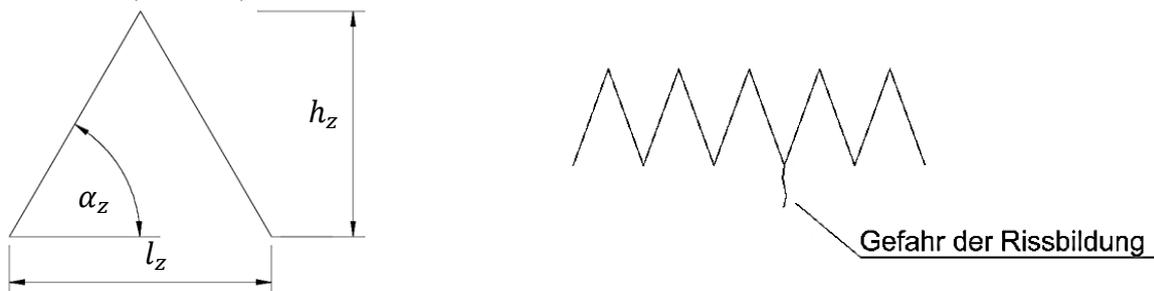


Abb. 3.7: Stahlverzahnung – Erste Überlegungen (Geometrie 1)

In dieser ersten Überlegung werden weder die Zahnschnecke noch der Zahngrund mit einem Radius versehen, was zur Gefahr der Rissbildung im Zahngrund führt. Um Spannungsspitzen im Zahngrund zu minimieren, wird eine Ausrundung vorgesehen (Abb. 3.8).

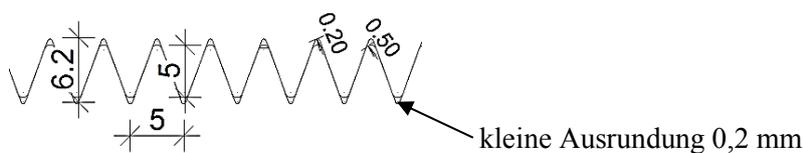


Abb. 3.8: Stahlverzahnung mit kleinen Ausrundungen (Geometrie 1.2)

Der Zahn wird durch die einwirkende Kraft F_z , welche unter einem Winkel ξ auf die Zahnflanke trifft, belastet. Nachfolgend soll der Einfluss der Zahnflankenneigung auf das Tragverhalten des Zahnes gezeigt werden (Abb. 3.9).

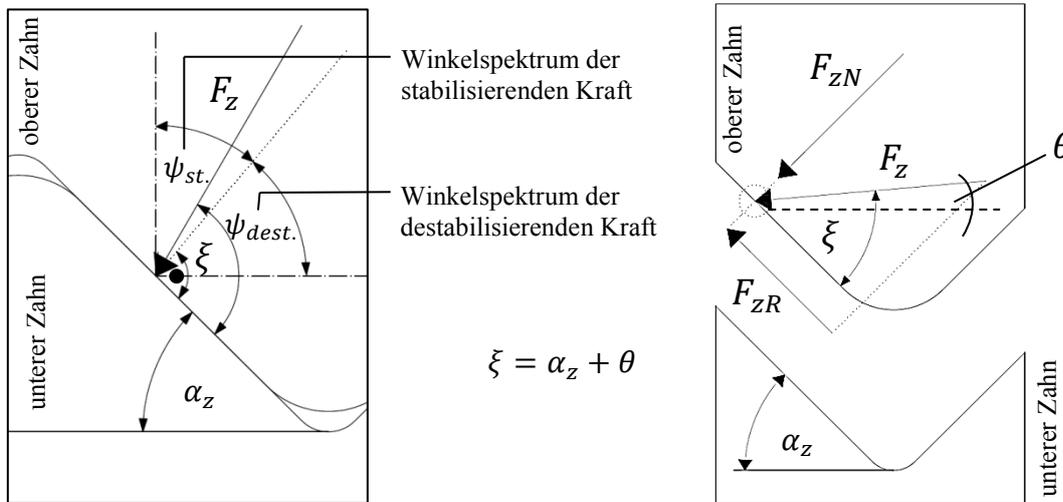


Abb. 3.9: Kraftangriff am Stahlzahn

Es gilt

$$F_{zR} = \cos(\xi) \cdot F_z \quad (Gl.3.10) \quad \text{und} \quad F_{zN} = \sin(\xi) \cdot F_z \quad (Gl.3.11)$$

und somit für einen Winkel $\xi = 90^\circ$, dass der Anteil aus F_{zR} zu Null wird und die Kraft $F_{zN} = F_z$. Der Winkel $\xi = 90^\circ$ stellt somit einen Grenzfall dar, bei dem weder eine stabilisierende noch eine destabilisierende Kraft wirkt. Der Winkel $\psi_{st.}$ bezeichnet das stabilisierende, $\psi_{dest.}$ das destabilisierende Winkelspektrum des Kraftangriffs F_z . Dabei ist $\psi_{st.} = \alpha_z$. Je größer der Winkel α_z ist, desto größer ist das stabilisierende Spektrum der möglichen Kraftneigungswinkel.

Somit werden folgende Fälle betrachtet.

- Stabilisierend: $\xi > 90^\circ$ ($- F_{zR}$)
- Grenzfall: $\xi = 90^\circ$ ($F_{zR} = 0$)
- Destabilisierend: $\xi < 90^\circ$ (F_{zR})

Um die Anwendung möglichst flexibel gestalten zu können, soll ein möglichst großer Winkel α_z gewählt werden. Eine Grenzbetrachtung ist der Winkel $\alpha_z = 90^\circ$, bei dem Schubkräfte tangential zur Bauteilfuge unter einem rechten Winkel auf die Zahnflanke treffen. Für eine kraftaffine Verzahnung ist das sinnvoll. Bei einer flexiblen Geometriegestaltung hinsichtlich der Krafrichtung führt es jedoch zu rechteckigen Zähnen und somit zu einer Erhöhung der mit der Verbindung möglichen Toleranzen.

Bei der Geometriefindung werden Gewinde betrachtet. Dabei stellt das Trapezugewinde nach (DIN 103) sowie das Whitworthgewinde nach (BS 84) die effektivste Geometrie dar. Beide Gewinde haben mit Zahnflankenneigungen von 75° (Trapezugewinde) und $62,5^\circ$ (Whitworthgewinde) hinsichtlich der stabilisierenden Wirkung eine günstige Geometrie (Abb. 3.10). Beim Trapezugewinde wird trotz der steilen Flankenneigung ein robuster Zahn erreicht. Je nachdem, ob die Trapezform schlank oder gedrungen ausgeführt wird, variieren die möglichen Toleranzgrenzen.

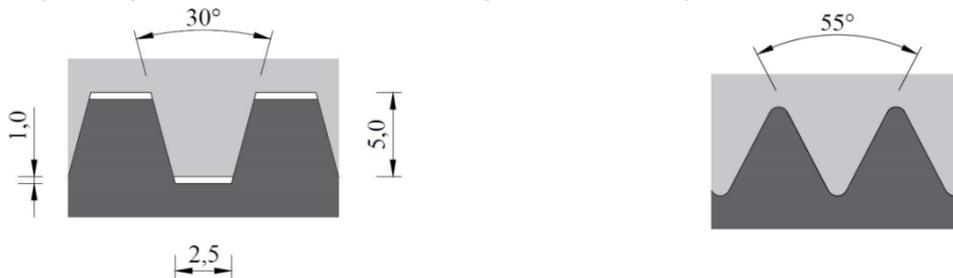
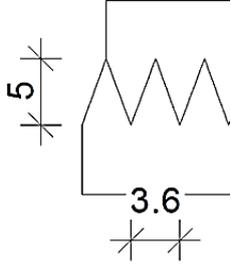
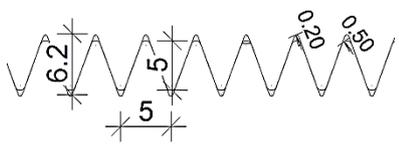
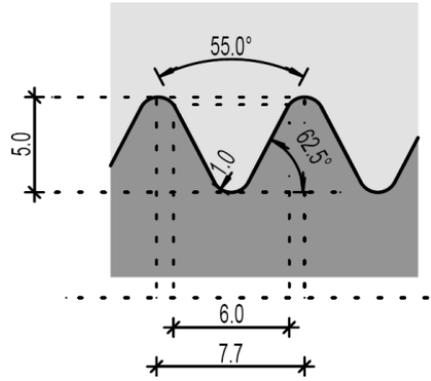


Abb. 3.10: Trapezugewinde nach DIN 103 (links) und Whitworth-Regelgewinde nach BS 84 (rechts)

3. Entwicklung der Stahlzahngeometrie

Mit dem Whitworth-Regelgewinde mit $62,5^\circ$ Flankenneigung kann eine robuste Konstruktion hergestellt werden. Als robust wird eine Zahnkonstruktion bezeichnet, wenn ein ausreichender Widerstand hinsichtlich der Verformungen gegeben ist. Das ist im Allgemeinen bei einem Verhältnis $h_z/l_z \leq 1$ der Fall. Dies wird beim Entwurf der *Geometrie 1.3* (Tab. 3.2) zu Grunde gelegt. Die Zahnhöhe beträgt 5 mm analog der ersten Entwürfe (*Geometrie 1.1* und *1.2*). Um noch kleinere Toleranzgrenzen abbilden zu können, wird das Whitworth-Regelgewinde in *Geometrie 1.4* mit 70° geneigten Zahnflanken konstruiert. Beide Geometrien werden an der Zahnspitze und am Zahngrund mit $r = 1,5$ mm ausgerundet. Um diese Ausrundung noch größer zu gestalten und dadurch noch geringere Spannung im Ausrundungsbereich zuzulassen, werden diese Radien in *Geometrie 1.5* auf $r = 1,5$ mm erhöht (Tab. 3.2).

Tab. 3.2: Entwicklung der Geometrieentwürfe

Geometrie 1.1	Geometrie mit Zahnhöhe 5mm ohne Ausrundungen			
Zahnhöhe	Zahnneigung α_z	Zahngrund l_z	Ausrundung Zahnspitze	Ausrundung Zahngrund
5mm	70°	3,6mm	--	--
Vorteile	Großer Toleranzausgleich in feinen Schritten (3,6mm) möglich. Abdeckung eines stabilisierenden Kraftspektrums von 70° .			
Nachteile	Gefahr der Kerbrissbildung Geringe Robustheit durch schlanke Geometrie			
Geometrie 1.2	Geometrie mit Zahnhöhe 5mm mit kleinen Ausrundungen			
Zahnhöhe	Zahnneigung α_z	Zahngrund l_z	Ausrundung Zahnspitze	Ausrundung Zahngrund
5mm	70°	5,0mm	0,5mm	0,2mm
Vorteile	Großer Toleranzausgleich in feinen Schritten (5mm) möglich. Abdeckung eines stabilisierenden Kraftspektrums von 70° .			
Nachteile	Gefahr der Kerbrissbildung Geringe Robustheit durch schlanke Geometrie			
Geometrie 1.3	Geometrie mit Zahnhöhe 5mm auf Grundlage des Whitworth-Gewinde mit Zahnneigung $62,5^\circ$			
Zahnhöhe	Zahnneigung α_z	Zahngrund l_z	Ausrundung Zahnspitze	Ausrundung Zahngrund
5mm	$62,5^\circ$	7,7mm	1,0mm	1,0mm
Vorteile	Robustheit durch flachere Neigung, da somit der Zahn gedrungener ist. Abdeckung eines stabilisierenden Kraftspektrums von $62,5^\circ$.			
Nachteile	Großer Toleranzausgleich in großen Schritten (7,7mm) möglich. Geringe Ausrundung.			

3. Entwicklung der Stahlzahngeometrie

Forts. Tab. 3.2: Entwicklung der Geometrieentwürfe

Geometrie 1.4				
Geometrie mit Zahnhöhe 5mm und 70° Zahnneigung und 1,0mm Radius Ausrundung				
Zahnhöhe	Zahnneigung α_z	Zahngrund l_z	Ausrundung Zahnspitze	Ausrundung Zahngrund
5mm	70	6,4mm	1,0mm	1,0mm
Vorteile	Die Höhe der möglichen Toleranzen sowie die Robustheit der Zahngeometrie bilden in Geometrie 1.4 ein verträgliches Mittel. Abdeckung eines stabilisierenden Kraftspektrums von 70°.			
Nachteile	Großer Toleranzausgleich in großen Schritten (6,4mm) möglich.			
Geometrie 1.5				
Geometrie mit Zahnhöhe 5mm und Beibehaltung der 70° Zahnneigung und 1,5mm Radius Ausrundung				
Zahnhöhe	Zahnneigung α_z	Zahngrund l_z	Ausrundung Zahnspitze	Ausrundung Zahngrund
5mm	70°	7,8mm	1,5mm	1,5mm
Vorteile	Robustheit durch große Ausrundung. Kerbgefahr durch große Ausrundung gering. Abdeckung eines stabilisierenden Kraftspektrums von 70°.			
Nachteile	Großer Toleranzausgleich in großen Schritten (7,8mm) möglich.			

Aufgrund der Vorteile bei der Toleranzbetrachtung wird die Geometrie 1.4 (Tab. 3.2) favorisiert. Der Zahnkopf wird jedoch gekappt (Abb. 3.11 rechts), wodurch Spannungskonzentrationen am Zahnkopf (Abb. 3.11 links) und Passungengenauigkeiten vermieden werden. Außerdem ist ein runder Zahnkopf aus herstelltechnischer Sicht nicht wirtschaftlich ausführbar.

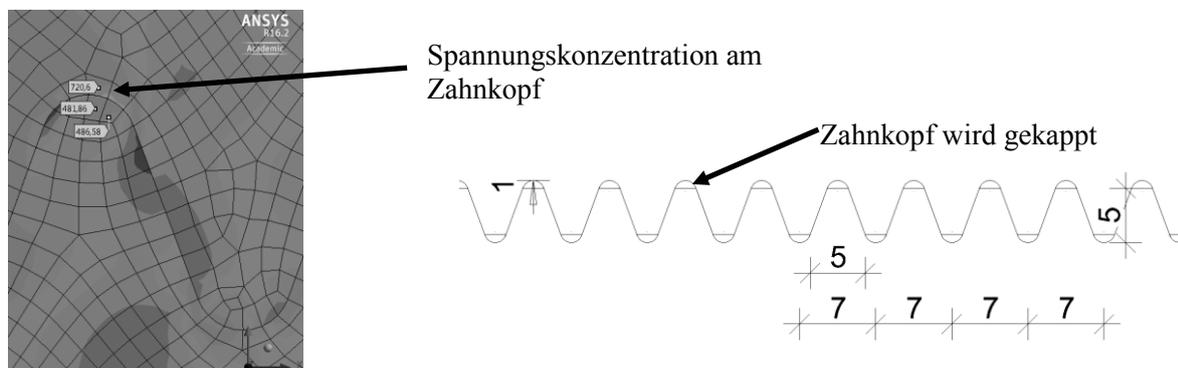
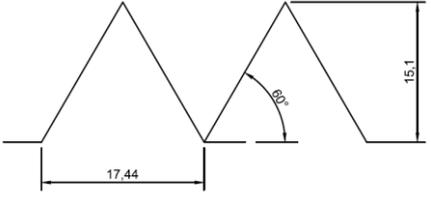
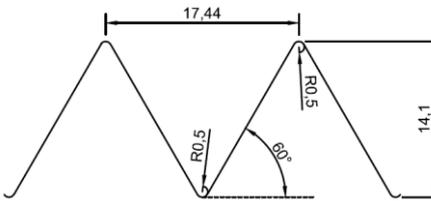
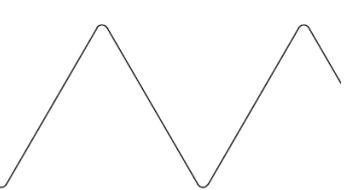
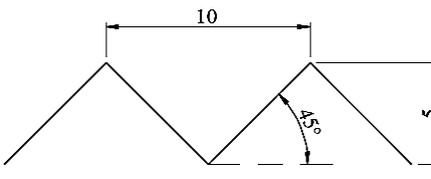
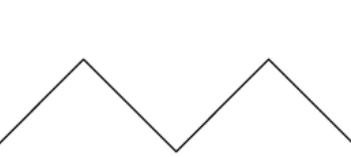
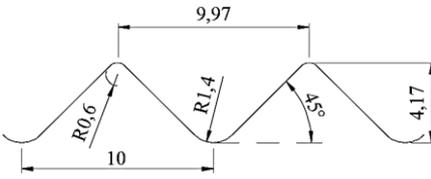
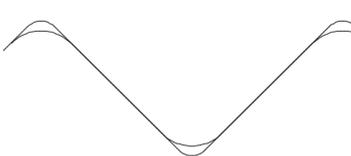
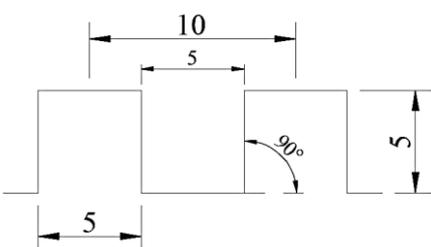
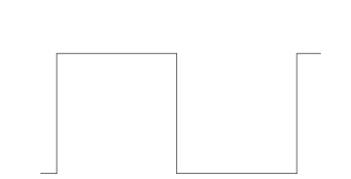


Abb. 3.11: Stahlzahn - Auszug aus der FE-Rechnung und trapezförmige Geometrie

3. Entwicklung der Stahlzahngeometrie

Aus den vorangegangenen Überlegungen zur Geometrie (Tab. 3.2) werden weitere Geometrien entworfen und in FE-Rechnungen untersucht (Tab. 3.3). Die Bezeichnung der Zahngeometrien besteht aus zwei Buchstaben und einer Zahl. Der erste Buchstabe G steht für Geometrie, der zweite Buchstabe steht für die Art der Geometrie (D=Dreieck, T=Trapez, R=Rechteck) und die Zahl steht für die Anzahl der Zahngeometrien je Geometrieart.

Tab. 3.3: Zahngeometrien für die Parameterstudie

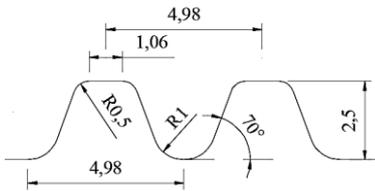
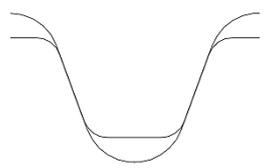
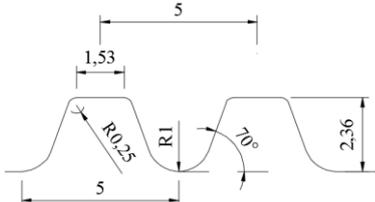
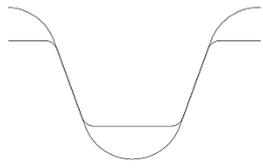
Bezeichnung	Grund- geometrie	Geometrie	Kontaktsituation
GD1	Dreieck		
GD2	Dreieck		
GD3	Dreieck		
GD4	Dreieck		
GR1	Rechteck		

3. Entwicklung der Stahlzahngeometrie

Forts. Tab. 3.3: Zahngeometrien für die Parameterstudie

Bezeichnung	Grund- geometrie	Geometrie	Kontaktsituation
GR2	Rechteck		
GT1	Trapez		
GT2	Trapez		
GT3	Trapez		
GT4	Trapez		
GT5	Trapez		

Forts. Tab. 3.3: Zahngeometrien für die Parameterstudie

Bezeichnung	Grund- geometrie	Geometrie	Kontaktsituation
GT6	Trapez		
GT7	Trapez		

3.5 Werkstoff und Werkstoffmodell Stahl

3.5.1 Materialkennwerte Stahl

Verwendeter Stahl

Für alle Versuchskörper wird die Stahlgüte S235 verwendet. Damit werden die Prüfkörper so konstruiert, dass die Maximallast der Prüfmaschine nicht überschritten wird. Es sei angemerkt, dass auch ein Stahl S 235 i.d.R. höhere Kenndaten aufweist als gefordert. Die Güten S235 und S335 in einer Charge herzustellen, ist für den Stahlhersteller häufig die wirtschaftlichere Variante. Die genauen Werkstoffdaten werden nach der Prüfnorm DIN EN ISO 6892-1 ermittelt. Aus den gleichen Stahlblechen der Prismenversuchskörper werden Stahlzugproben gemäß DIN 50125 herausgearbeitet und daran die Materialkennwerte ermittelt (Abb. 3.12).

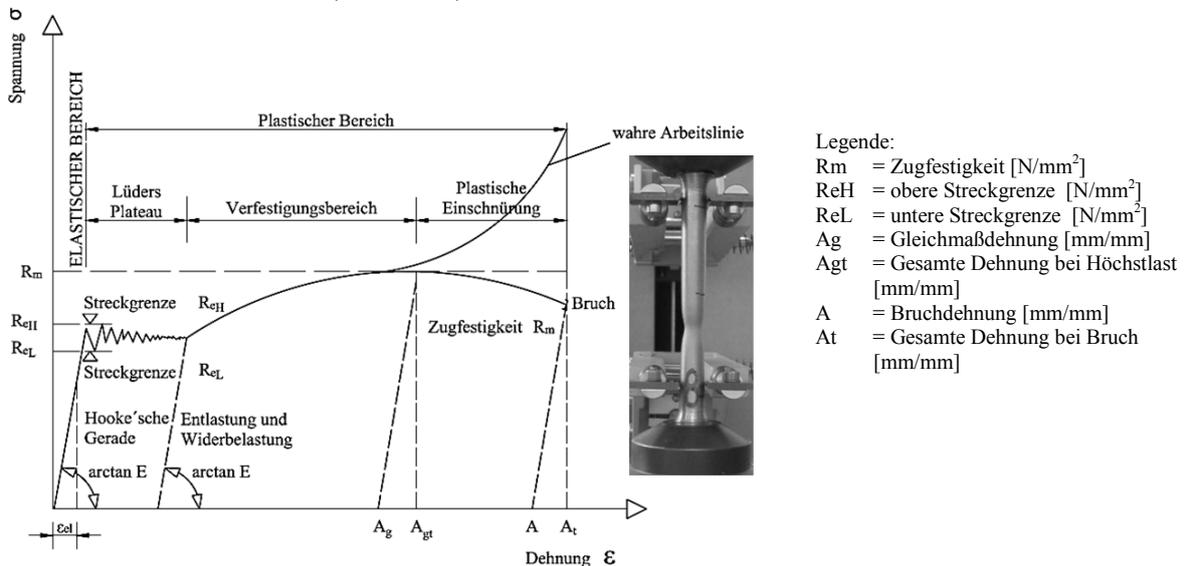


Abb. 3.12: Spannungs-/Dehnungsdiagramm eines warmgewalzten Stahl (nach bauforumstahl 2012)

Fließbedingung und Fließregel

Die verwendete Fließbedingung F ist die Gestaltänderungsenergie-Hypothese nach von Mises. Die Gesamtenergie die in einem belasteten Körper vorherrscht, besteht aus einem hydrostatischen und einem gestaltändernden Anteil. Da die Spannungen des hydrostatischen Anteils in allen Richtungen gleich sind, ist nur die Energie der Gestaltänderung zu betrachten, denn diese führt zum Versagen. Die Arbeit, die in einem räumlichen Spannungszustand zur Gestaltänderung führt, ist zum Zeitpunkt des

Versagens die gleiche wie in einem eindimensionalen Spannungszustand. Demzufolge kann die aus dem Zugversuch (eindimensional) gewonnene Materialkennlinie mithilfe der Fließbedingung F auch auf das 3D-Modell angewendet werden. Die Fließbedingung F kann in Invarianten wie folgt beschrieben werden:

$$F = \sqrt{3J_2} = \sigma_F \quad \text{Gl. (3.12)}$$

Der Werkstoff liegt im elastischen Bereich wenn F einen Wert kleiner σ_F aufweist. Plastisches Verhalten gilt für $F = \sigma_F$. Werte größer σ_F führen zum Versagen und sind daher nicht zulässig.

Dabei ist J_2 die zweite Invariante des Spannungsdeviators s_{ij} .

$$J_2 = \frac{1}{6} \cdot ((\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2) \quad \text{Gl. (3.13)}$$

Unter Berücksichtigung der Dehnungen ε (Hauptdehnungen $\varepsilon_1, \varepsilon_2, \varepsilon_3$) und somit des Elastizitätsmodul E und der Querdehnzahl ν folgt die Gestaltsänderungsenergie für den räumlichen Spannungszustand (3D):

$$W_{G,3D} = \frac{1 + \nu}{6 \cdot E} \cdot ((\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2) \quad \text{Gl. (3.14)}$$

Im eindimensionalen Spannungszustand (1D) werden die Hauptspannungen σ_2 und σ_3 zu Null und es folgt

$$W_{G,1D} = \frac{1 + \nu}{6 \cdot E} \cdot ((\sigma_1)^2 + (\sigma_1)^2) \quad \text{Gl. (3.15)}$$

Die Gestaltsänderungsenergie des realen Spannungszustands in Gl. (3.14) entspricht den fiktiven Normalspannungen in Gleichung (3.16). Die Spannung σ_1 wird deshalb als Vergleichsspannung σ_v bezeichnet. Durch Gleichsetzen der Gleichungen (3.14) und (3.15) folgt die Vergleichsspannung σ_v im räumlichen Spannungszustand:

$$\sigma_v = \sqrt{\frac{1}{2} \cdot [(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2]} \leq \sigma_F \quad \text{Gl. (3.16)}$$

In Normal- und Schubspannungen ausgedrückt:

$$\sigma_v = \sqrt{\sigma_x^2 + \sigma_y^2 + \sigma_z^2 - \sigma_x \cdot \sigma_y - \sigma_x \cdot \sigma_z - \sigma_y \cdot \sigma_z + 3(\tau_{xy}^2 + \tau_{xz}^2 + \tau_{yz}^2)} \leq \sigma_F \quad \text{Gl. (3.17)}$$

Für den ebenen Spannungszustand gilt $\sigma_3 = 0$, wodurch sich die Formel vereinfacht zu:

$$\sigma_v = \sqrt{\sigma_1^2 - \sigma_1 \cdot \sigma_2 + \sigma_2^2} \quad \text{Gl. (3.18)}$$

Die Fließbedingung nach von Mises kann im Raum dargestellt werden (Abb. 3.13). Diese ist ein Zylinder mit der hydrostatischen Achse als Rotationsachse. Wird dieser Zylinder in der Ebene σ_1/σ_2 geschnitten, erhält man den ebenen Spannungszustand mit $\sigma_3 = 0$ und somit die ellipsenförmige Fließortkurve. Eine weitere Fließbedingung ist die Schubspannungshypothese nach Tresca. Auf diese kann im Rahmen der hier vorliegenden Arbeit nicht näher eingegangen werden. Sie wird jedoch in den Überlegungen bei der Interpretation der Ergebnisse berücksichtigt (vgl. Rust 2009).

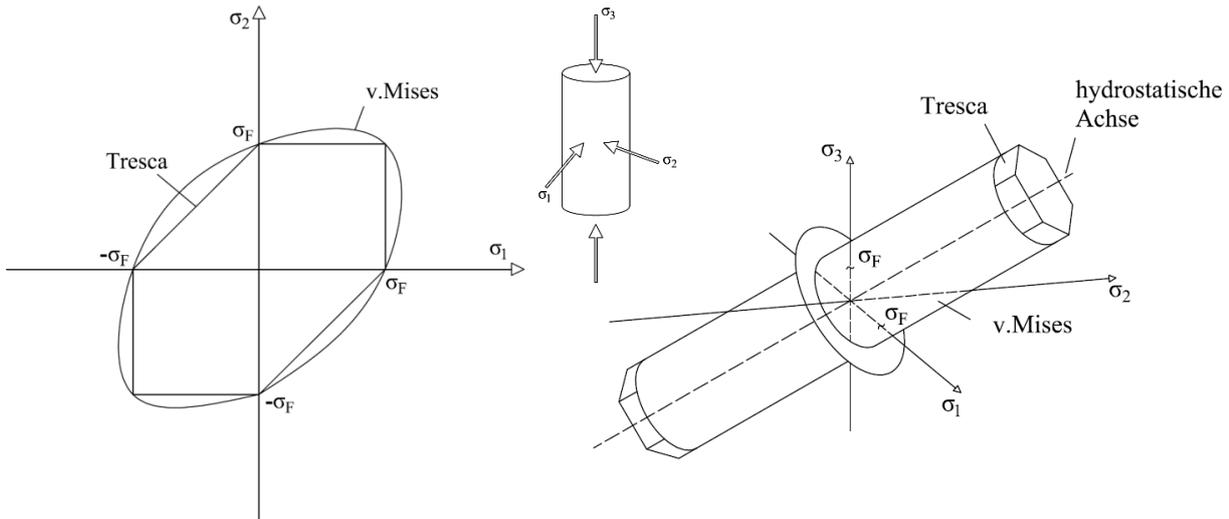


Abb. 3.13: Von Mises Fließfläche (Fließortkurve) (links); durch Hauptspannungen belasteter Körper (mitte) und Fließbedingung für v. Mises-Plastizität; Jeweils im Hauptspannungskoordinatensystem.

Lineares Werkstoffverhalten des Stahls

Im Bereich der Hooke'schen Gerade befindet sich der Stahl im linearelastischen Bereich. Die Bestimmung des E-Modul nach DIN EN ISO 6892-1 erfolgt in diesem Bereich.

Nichtlineares Werkstoffverhalten des Stahls

Der nichtlineare Verlauf der Spannungs-/Dehnungslinie wird sowohl Bi- als auch Multilinear abgebildet (Abb. 3.16). Der bilineare Bereich wird durch den Tangentenmodul gekennzeichnet. Dieses wird bis zur Zugfestigkeit sowie bis zum Bruch dargestellt. Der multilineare Verlauf wird aus dem Mittelwert mehrerer Zugversuche abgeleitet. Aus den Zugversuchen resultiert der Verlauf der „Ingenieurspannungen“, bei denen die Kraft auf den Ausgangsquerschnitt der Stahlzugprobe bezogen wird.

$$\sigma_{Ing.} = \frac{F}{A_0} \quad \text{Gl. (3.20)}$$

Die dazugehörige Dehnung ist als Längenänderung bezogen auf die Ausgangslänge definiert.

$$\varepsilon_{Ing.} = \frac{\Delta l}{l_0} \quad \text{Gl. (3.21)}$$

Im Gegensatz zur „Ingenieurspannung“, bei der der Ausgangsquerschnitt zu Grunde liegt, erfolgt in der FE-Analyse die Spannungsberechnung unter Berücksichtigung der Querschnittsänderung. Die aus der Querschnittsänderung resultierenden „wahren (Cauchy)-Spannungen“ und die logarithmischen (Hencky)-Dehnungen werden im Werkstoffmodell berücksichtigt. Der Berechnung der wahren Dehnungen wird nicht die Ausgangslänge l_0 , sondern die bereits vorverformte Länge $l_0 + \Delta l_1$ zugrunde gelegt. Das bedeutet eine Aufsummierung der Dehnungen mit jedem Lastschritt zu $\varepsilon = \sum \Delta \varepsilon$ und kann auch als Integral geschrieben werden:

$$\begin{aligned} \varepsilon_{Wahr} &= \int_{l_0}^{(l_0 + \Delta l)} d\varepsilon = \int_{l_0}^{(l_0 + \Delta l)} \frac{1}{(l_0 + \Delta l)} dl = [\ln(l_0 + \Delta l)]_{l_0}^{(l_0 + \Delta l)} = \ln(l_0 + \Delta l) - \ln(l_0) \\ &= \ln\left(\frac{l_0 + \Delta l}{l_0}\right) = \ln\left(1 + \frac{\Delta l}{l_0}\right) \end{aligned} \quad \text{Gl. (3.22)}$$

Somit kann die wahre Dehnung direkt über die Ingenieursdehnung berechnet werden.

$$\varepsilon_{Wahr} = \ln(1 + \varepsilon_{Ing.}) \quad \text{Gl. (3.23)}$$

Für einen einachsigen Spannungszustand gilt:

$$\varepsilon_y = \varepsilon_z = -\nu \cdot \varepsilon_x = -\nu \cdot \ln\left(1 + \frac{\Delta l}{l_0}\right) = \ln\left[\left(1 + \frac{\Delta l}{l_0}\right)^{-\nu}\right] \quad \text{Gl. (3.24)}$$

Dabei kann über die Dehnungen ε_y und ε_z die geänderte Querschnittsfläche berechnet werden.

$$A_{Wahr} = A_0 \cdot \left(1 + \frac{\partial u_y}{\partial y}\right) \cdot \left(1 + \frac{\partial u_z}{\partial z}\right) \quad \text{Gl. (3.25)}$$

Unter Berücksichtigung der Gleichung (3.24) gilt somit

$$A_{Wahr} = A_0 \cdot \left(1 + \frac{\Delta l}{l_0}\right)^{-2\nu} \quad \text{Gl. (3.26)}$$

Daraus kann die wahre Spannung berechnet werden.

$$\sigma_{Wahr} = \frac{F}{A_0} \cdot \left(1 + \frac{\Delta l}{l_0}\right)^{2\nu} \quad \text{Gl. (3.27)}$$

Setzt man für den Werkstoff Metall mit inkompressiblen plastischen Dehnungen nun die Querkontraktionszahl ν zu 0,5 folgt:

$$\sigma_{Wahr} = \frac{F}{A_0} \cdot \left(1 + \frac{\Delta l}{l_0}\right) \quad \text{Gl. (3.28)}$$

Anhand der Zugprobe der Stahlkennwertermittlung (Abb. 3.16) werden exemplarisch die wahren Spannung aus Gl. (3.27) berechnet und dabei die Querdehnzahl ν von 0,1 bis 1,0 variiert und mit der wahren Spannung Gl. (3.28) sowie der Ingenieursspannung aus Gl. (3.20) verglichen. Die Spannungen nach den Gl. (3.20), (3.27) und (3.28) können in Abhängigkeit der Querdehnzahl ν dargestellt werden (Abb. 3.15). Die Verläufe der Grafen zeigen, dass die Spannungen nach Gleichung (3.28) bis zu einer Querdehnzahl $\nu = 0,5$ auf der sicheren Seite liegen. Damit kann für den Werkstoff Stahl aus der Ingenieurspannung und der Ingenieurdehnung direkt die wahre Spannung berechnet werden, da für Stahl die Querdehnzahl zu 0,3 angesetzt wird (vgl. Rust 2009).

$$\sigma_{Wahr} = \sigma_{Ing.} \cdot (1 + \varepsilon_{Ing.}) \quad \text{Gl. (3.29)}$$

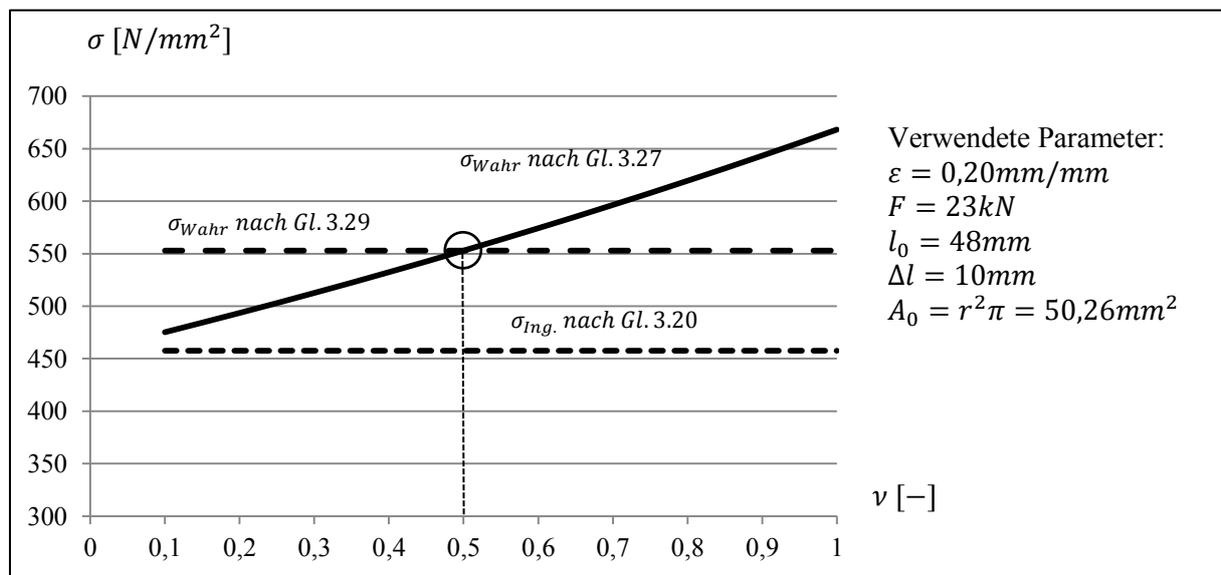


Abb. 3.15: Spannungen nach den Gl. 20, 27, 28 in Abhängigkeit der Querdehnzahl ν .

Es werden zwei unterschiedliche Stahlbleche verwendet und daher auch zwei Stahlkennlinien ermittelt. Diese werden mit Charge 1 und Charge 2 bezeichnet (Anhang B). Bei der Anwendung der Materialkennlinie zur Versuchsnachrechnung wird zwischen einer Ingenieursspannung und einer wahren Spannung unterschieden (Abb. 3.12).

Tab. 3.4: Übersicht Versuche und Stahl-Charge

Versuchsphase (vgl. Kap. 1)	Versuch	Charge
Phase I	Stahlprisma	Charge 1
Phase I (zusätzliche Prüfkörper)	Stahlprisma	Charge 2
Phase II	Betonprisma mit Stahlzahnleiste	Charge 1
Phase III	Konsole	Charge 1
Phase III (zusätzliche Prüfkörper)	Konsole	Charge 2
Phase IV	Knoten	Charge 1

3.5.2 Materialmodell Stahl

Verwendete Materialkennlinie

Die aus dem Zugversuch resultierende Werkstoffkennlinie wird in eine idealisierte Kennlinie überführt. Insbesondere im Bereich des Lüdersplateaus sowie im Bereich der maximalen Zugfestigkeit werden auf der sicheren Seite liegend kleine Änderungen vorgenommen.

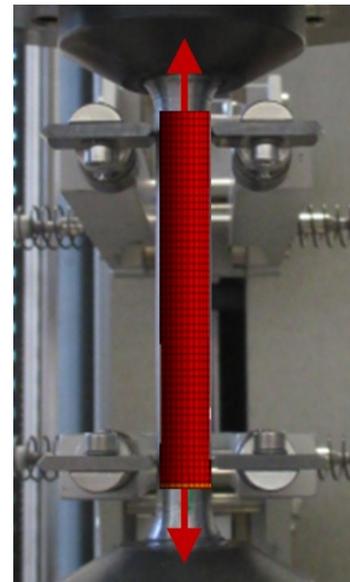
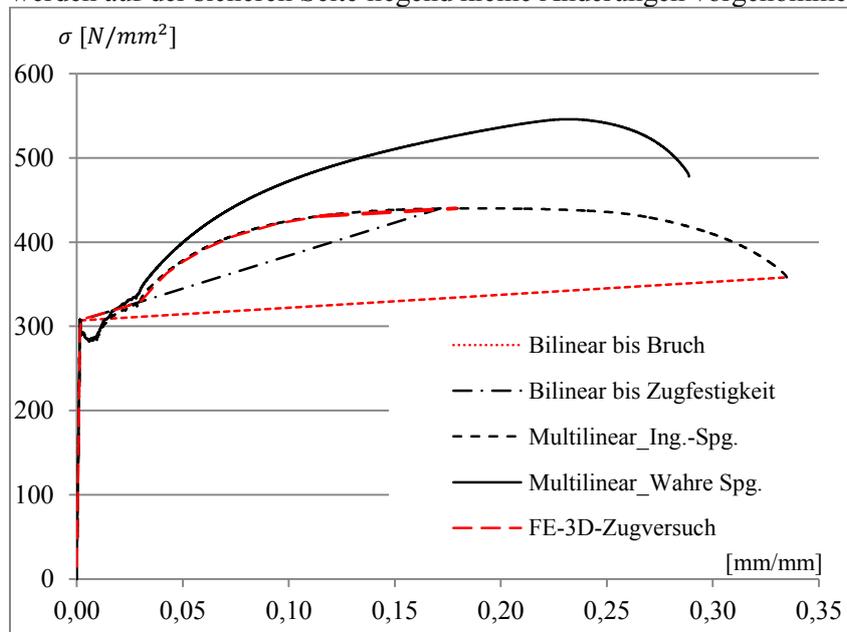


Abb. 3.16: Materialkennlinie Charge 1 für die Simulation

Die ermittelte Materialkennlinie wird mit den Materialkennlinien aus anderen Veröffentlichungen verglichen und eingeordnet (Abb. 3.17).

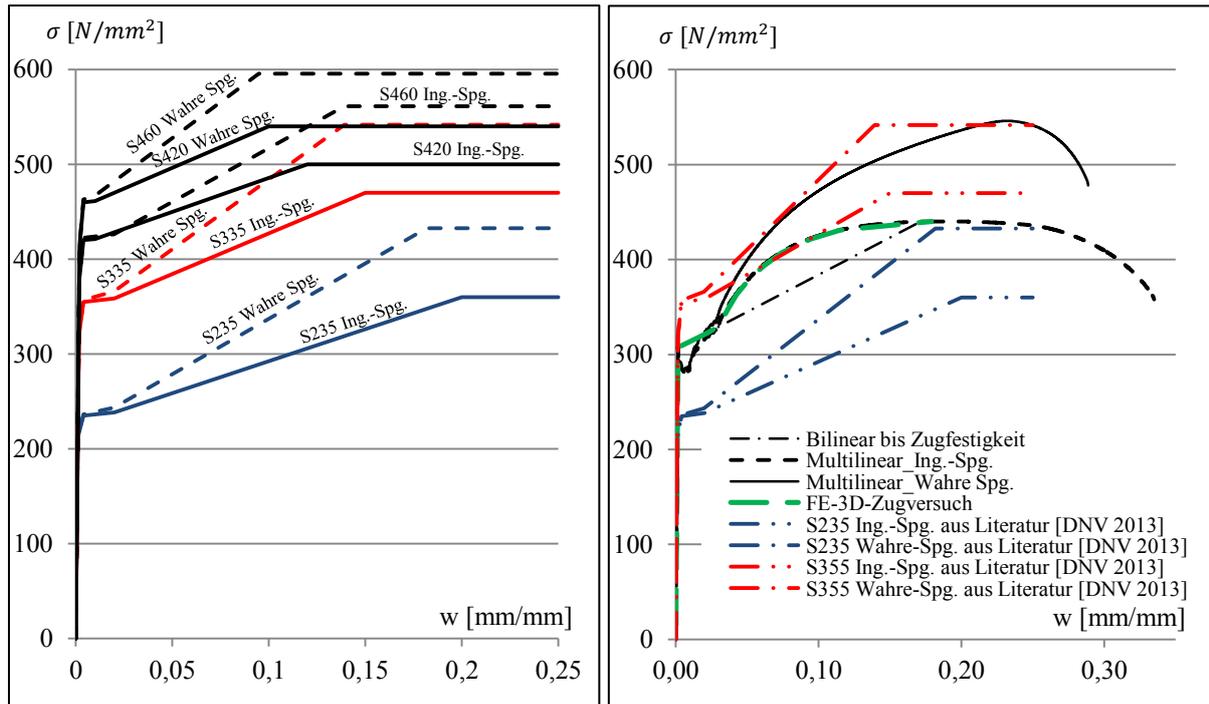


Abb. 3.17: Wahre- und Ingenieur-Materialkennlinien für Stahlsorten S235, S335, S420, S460 (DNV 2013)(links); Einordnung der Versuchskennlinien in die Kennlinien aus der Literatur (rechts)

Der für die Prüfkörper verwendete Stahl liegt zwischen den Stahlgüten S235 und S355. In der FE-Analyse werden die in den Versuchen ermittelten Kennlinien verwendet (Abb. 3.17).

3.6 Simulationsgrundlagen

3.6.1 Finite Elemente

Das Verhalten des finiten Elements wird mithilfe einer Ansatzfunktion numerisch angenähert. Die Ansatzfunktion wird über die Freiheitsgrade der Knoten definiert und kann linear oder nichtlinear sein (Tab. 3.4). Je höher der Polynomgrad der Ansatzfunktion ist, desto genauer ist der Ergebniswert. Der Ergebniswert (Dehnungen, Spannungen) wird durch Integration der Ansatzfunktion erzeugt und an den Integrationspunkten (Gaußpunkte) definiert. Die quadratische Ansatzfunktion hat zusätzliche Integrationspunkte. Es wird in 2D und 3D Berechnungen sowie zwischen dem Grundnetz des Körpers und der Verfeinerung an den Kontaktflächen unterschieden (Tab. 3.4).

Tab. 3.4: Kennwerte zu den verwendeten Elementen

	Lineare Ansatzfunktion	Quadratische Ansatzfunktion
<div style="display: flex; align-items: center;"> <div style="margin-right: 10px;"> IP =Integrationspunkt </div> <div> </div> </div>		
Grundnetz 2D	Rechteck mit 4 Knoten	Rechteck mit 8 Knoten
Verfeinerung 2D	Dreiecke mit 3 Knoten	Dreiecke mit 6 Knoten
Grundnetz 3D	Hexameter mit 8 Knoten (TED-Elemente)	Hexameter mit 20 Knoten (HEX-Elemente)
Verfeinerung 3D	Tetraeder mit 4 Knoten	Dreiecke mit 10 Knoten

3.6.2 Finite Elemente Netz

Einfluss der Netzgröße auf die Konvergenz

In einer Vorstudie werden die Zahngeometrien GD1 bis GT5 (Tab. 3.3) in Abhängigkeit der Netzgröße, der Kontaktsteifigkeit sowie des Reibbeiwertes untersucht. Die Berechnungen sind Kraftkonvergent, Netzkonvergent (die gemittelten Vergleichsspannungen weichen bei iterativer Netzverfeinerung um nicht mehr als 5% zur vorangegangenen Berechnung ab), die gemittelten Spannungen und die ungemittelten Spannungen weichen weniger als 20% voneinander ab, der Großteil (ca. 60-80%) der Elemente weisen ein Seitenverhältnis von 1 auf und das Jacobi-Verhältnis liegt bei den berechneten Systemen i.d.R. nahe der 1. Diese Kriterien sind Anhaltspunkte für ein gutes Netz.

Es werden folgende Parameter variiert:

- Kontaktsteifigkeit 0,5 und 1,0 [-]
- Reibbeiwert μ 0,0; 0,2 [-]
- Netzgröße 0,6; 0,8; 1,0; 1,5; 2,0 [mm]

Die genannten Kriterien finden bei den Zahngeometrien GD1 bis GT5 mit einer Netzgröße von 0,8 bis 1mm und einer Verfeinerung an der Verzahnung von 0,2 mm eine gute Übereinstimmung. Mit diesen Werten werden die weiteren Parameteruntersuchungen durchgeführt.

3.6.3 Geometrische Nichtlinearität

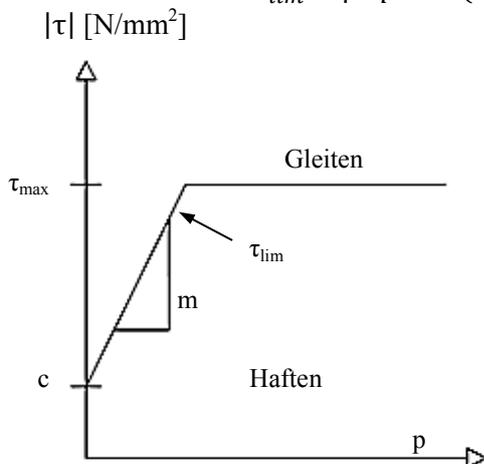
Berücksichtigung der Verformung des Zahnes während des Berechnungsverlaufes

Die Last wird in mehreren Schritten am System aufgebracht und je Schritt eine dazugehörige Verformung berechnet. Diese Verformung wiederum ist Ausgangsgeometrie für den nächsten Lastschritt. Die Kraft greift somit iterativ am verformten System an und berücksichtigt eine damit verbundene Steifigkeitsänderung der Verzahnung durch plastisches Verhalten.

Kontakt

Zwei sich berührende Bauteile können Kräfte normal und tangential zur Kontaktfläche übertragen. Dazu werden Parameter für den Kontakt (Kontaktkörper, Zielkörper, Reibbeiwert μ) definiert. Beide Prüfkörper stehen über eine gezahnte Grenzfläche miteinander in Kontakt. Diese Grenzfläche wird im 2D-Modell als Grenzlinie, im 3D-Modell als Grenzfläche abgebildet. Der obere Prüfkörper wird als Kontaktkörper der untere Prüfkörper als Zielkörper definiert. Dabei wird der Punkt-zu-Oberfläche-Kontakt benutzt. Die Kontaktbedingung überprüft an Integrationspunkten, welche mit der linearen und quadratischen Ansatzfunktion berechnet werden können, ob die beiden Körper (Kontakt/Ziel) einen Abstand aufweisen, aneinander liegen oder sich durchdringen. Die Kontaktkräfte auf der Fläche greifen senkrecht (Flächennormale), die Reibungskräfte parallel zur Fläche an. Die Reibung wird dabei nach dem Coulomb'schen Gesetz (Abb. 3.18) berücksichtigt zu

$$\tau_{lim} = \mu \cdot p + c \quad (Gl. 3.30) \quad \text{und} \quad \|\tau\| \leq \tau_{lim} \quad Gl. (3.31)$$



mit:

$|\tau|$ = Betrag der Schubspannung

$$\|\tau\| = \begin{cases} |\tau| & = \text{Spannung für 2D - Kontakt} \\ \sqrt{\tau_1^2 + \tau_2^2} & = \text{Spannung für 3D - Kontakt} \end{cases}$$

τ_{lim} = Grenze τ zwischen Haften und Gleiten

μ = Reibungskoeffizient für isotropische Reibung

p = Normalspannung

c = Kontaktkohesion

Abb. 3.18: Reibungsmodell isotropic friction in Ansys nach dem Coulomb'schen Gesetz (Ansys 2018)

Die Kontaktkräfte werden mit der Penalty-Methoden-Variante berechnet, bei der die Steifigkeitsmatrix um einen imaginären Term, den Penalty-Term, erweitert wird. In der Berechnung dringt der Kontaktkörper imaginär in den Zielkörper ein. Der Zielkörper kann dieser Eindringung eine Federsteifigkeit entgegen setzen (Abb. 3.19). Diese Federsteifigkeit ist relativ zur Steifigkeit der Kontaktkörper und muss größer als deren Steifigkeit sein, sodass die Eindringungen klein bleiben und eine numerische Lösung möglich ist (Rust 2011). Wenn beide Körper eine hohe Steifigkeit aufweisen, sind die Durchdringungen klein. Es ist ein großer Steifigkeitskoeffizient notwendig, sodass die Multiplikation aus Steifigkeit und Eindringung einen angemessenen Korrekturbeiwert liefert. In der FE-Rechnung wird dieser Korrekturbeiwert als Kontaktsteifigkeitsfaktor bezeichnet. Dieser wird bei einem sehr steifen Druckkontakt zweier Stahlelemente mit >1 empfohlen.

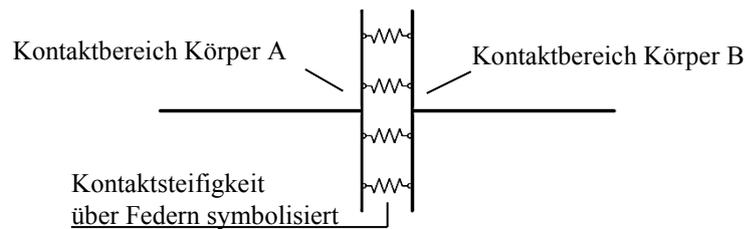


Abb. 3.19: Darstellung der Kontaktsteifigkeit über Federn (links)

Kontakt der Stahl/Stahlzähne:

Es werden ein reibungsfreier Kontakt und ein reibungsbehafteter Kontakt untersucht. Zur Berechnung der Kräfte im reibungsfreien Kontakt wird das Erweiterte-Lagrange-Verfahren, im reibungsbehafteten Kontakt das Pure-Penalty-Verfahren angewandt. Beide Kontakttypen stellen eine geometrische Nichtlinearität dar.

Kontakt der betonseitigen Stahlzähne:

Der Kontakt der betonseitigen Stahlzähne inklusive des angrenzenden Betons wird sowohl als Verbund und reibungsbehafteten Kontakt untersucht.

Einfluss des Kontaktsteifigkeitsfaktors auf die Konvergenz

Grundsätzlich hat der Kontaktsteifigkeitsfaktor einen Einfluss auf den Rechenlauf und damit unmittelbar auf die Kraftkonvergenz. Die Beurteilung der Kontaktsteifigkeit sollte während der Berechnung mithilfe der Kraftkonvergenz und des Kraftkriteriums erfolgen. Kraftkonvergenz und Kraftkriterium werden während des Berechnungslaufes als Graphen ausgegeben. In einem iterativen Prozess wird die Last schrittweise auf das System aufgegeben. Der Graph der Kraftkonvergenz ($f_{\text{konvergenz}}$) nähert sich von oben dem Graphen des Kraftkriteriums ($f_{\text{kriterium}}$) an. Durchstößt $f_{\text{konvergenz}}$ den Graph $f_{\text{kriterium}}$ und bleibt unter diesem, deutet das auf einem zu geringen Kontaktsteifigkeitsfaktor hin. Bleibt $f_{\text{konvergenz}}$ oberhalb, und beide Graphen laufen mit Abstand zueinander parallel, ist der Kontaktsteifigkeitsfaktor zu hoch. Anhand dieser Lösungsinformation wird der Kontaktsteifigkeitsfaktor angepasst. Die Vorstudie zur Konvergenz hat ergeben, dass die untersuchten Geometrien nicht durch eine Änderung des Kontaktsteifigkeitsfaktors von 0,5 auf 1 beeinflusst werden.

Einfluss der Reibung auf die Konvergenz

Bei der Simulation von Kontaktflächen mit Reibung kommt es zu einer Asymmetrie der Steifigkeitsmatrix. Das hat eine größere Rechenzeit zur Folge. Es kann vereinfachend mit einer symmetrischen Steifigkeitsmatrix gerechnet werden. Das Konvergenzverhalten kann dadurch verschlechtert werden. In den untersuchten Modellen wird jedoch kein negativer Einfluss der Reibung auf die Konvergenz festgestellt.

3.7 Analytische Entwicklung der Stahlzahngeometrie

3.7.1 Abmessungen und Lagerung der Zahnleiste sowie Belastung

Anhand einer Zahnleistenverbindung, bestehend aus zwei horizontal aufeinander liegenden Zahnleisten, wird eine Studie zum Zahngrundradius durchgeführt sowie verschiedene Zahngeometrien hin-

sichtlich der Vergleichsspannungen untersucht und verglichen. Die Belastung wird als konstante Flächenlast auf die obere Zahnleiste aufgegeben (Abb. 3.20).

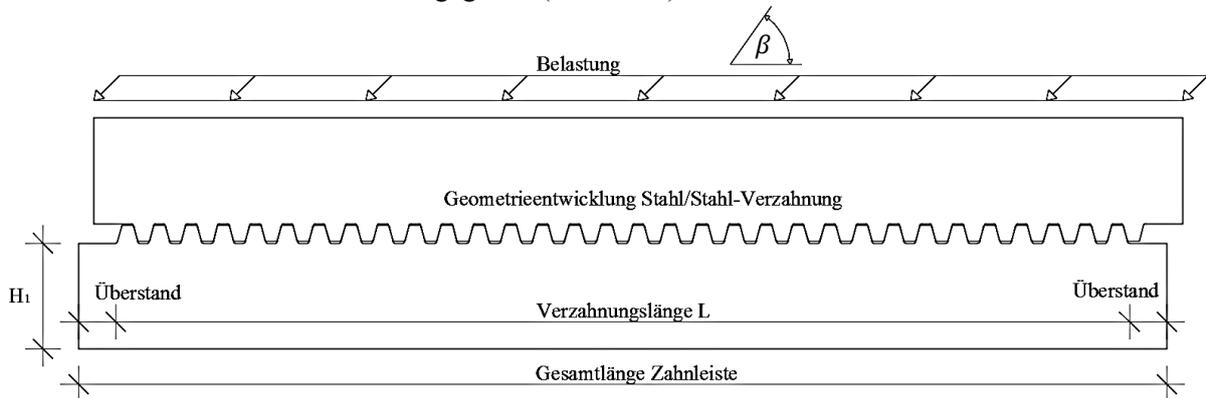


Abb. 3.20: Zahnleiste mit Belastung und Bezeichnung

Um ein Verdrehen zu vermeiden, wird die obere Zahnleiste an der Oberseite gegen Verdrehen gehalten. Horizontale (parallel zur Fuge) und vertikale (senkrecht zur Fuge) Verschiebungen werden hingegen nicht behindert (Abb. 3.21). Dies entspricht auch der Einbausituation der Zahnleiste in der Betonmatrix. Die Kraftübertragung von der oberen zur unteren Zahnleiste erfolgt über Kontakt zwischen den Stahlzähnen. Die untere Zahnleiste ist in Lagersituation 1 an der Unterseite und der Stirnseite gleitend gelagert (Abb. 3.21 links), wodurch die Vertikallast an der Unterseite und die Horizontallast an der Stirnseite der Zahnleiste aufgenommen wird. Ein Verdrehen der unteren Zahnleiste wird ebenfalls behindert. In Lagersituation 2 ist die untere Zahnleiste an der Unterseite eingespannt (Abb. 3.21 rechts).

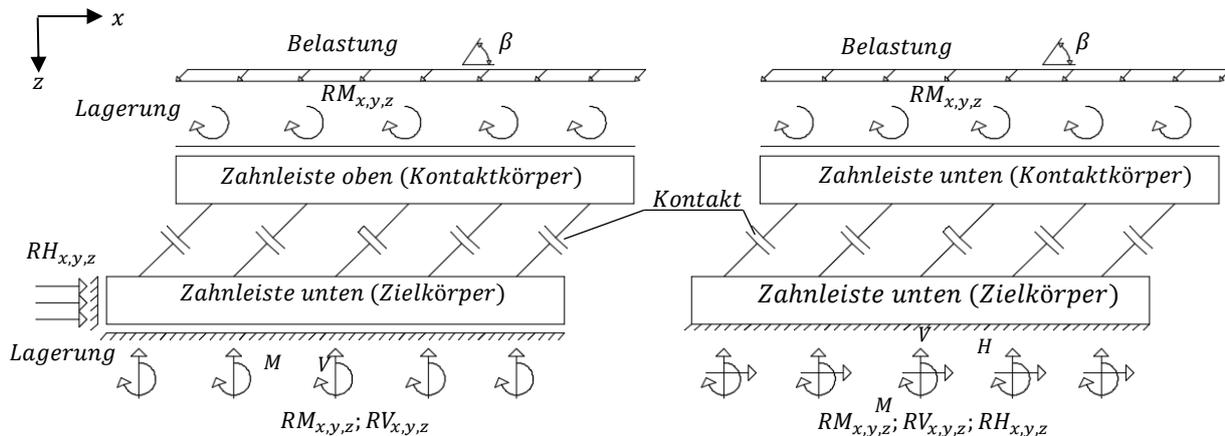


Abb. 3.21: System der FE-Berechnung eines belasteten Zahnleistenpaares, Lagersituation 1 (links) und Lagersituation 2 (rechts)

Die Lagersituation 2 ist in Anbetracht der Einbettung in den Beton die realistischere Lagersituation. Die Lastgrößen der Vertikal- und Horizontalkomponente sowie der Winkel werden in den einzelnen Rechnungen angegeben.

3.7.2 Aufbau der Studie mit FE-Berechnungen

Zunächst wird an einem FE-Modell (Geometrie vgl. Abb. 3.24) eine Studie zur Spannungsentwicklung in Abhängigkeit des Zahngrundradius mit der Lagersituation 1 durchgeführt. Anschließend werden die in Kapitel 3.4 aufgeführten Geometrien an einem weiteren Modell mit Lagersituation 1 und 2 simuliert und verschiedene Einflüsse betrachtet. Dabei wird die Spannungsverteilung an jedem Zahn an vier Messbereichen (Abb. 3.22) stichpunktartig abgelesen.

Messbereich 1: Vergleichsspannung, die als Spannungskonzentration im oberen Zahnflankenbereich auf das Phänomen der Hertz'schen Pressungen zurückzuführen ist.

Messbereich 2: Vergleichsspannung an der Zahnflanke

3. Entwicklung der Stahlzahngeometrie

Messbereich 3: Vergleichsspannung, die als Spannungskonzentration im unteren Zahnflankenbereich auf das Phänomen der Hertz'schen Pressungen zurückzuführen ist.

Messbereich 4: Vergleichsspannung an der Zahnausrundung

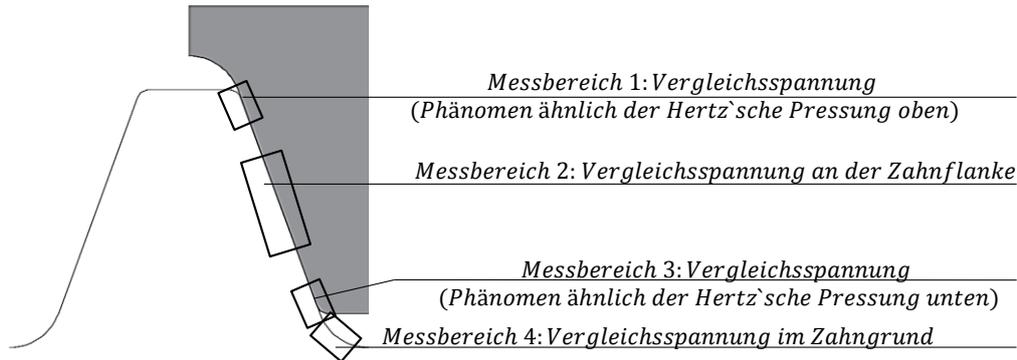


Abb. 3.22: Ablesebereiche der maßgebenden Vergleichsspannungen am Zahn

Es wird die Spannungsverteilung in Abhängigkeit der Lagersituation 1 und 2 dargestellt und der Einfluss der Lagerung sowie der Zahngeometrie untersucht. Für die weiteren Untersuchungen wird die Lagersituation 2 verwendet, da hierbei die Einbausituation am besten abgebildet werden kann. Die Vergleichsspannungen sind im Vergleich zu den anderen Geometrien bei Geometrie GT5 relativ niedrig bei gleichzeitig guten Toleranzeigenschaften. Deshalb werden weitere Untersuchungen mit der Geometrie GT5 durchgeführt. Dabei wird an Lagersituation 2 untersucht, wie sich die Spannungen bei einer Änderung des Reibbeiwertes verhalten. Des Weiteren wird durch Modifikation der Zahnleistenlänge geprüft, ob die Spannungsverteilung davon beeinflusst wird. Da die Last mit unterschiedlicher Größe und Neigung an der Zahnleiste angreifen kann, werden diese Parameter untersucht. Der Kontaktsteifigkeitsfaktor hat Einfluss auf den Rechenverlauf und in geringfügigem Umfang auf das Ergebnis. Deshalb wird auch der Kontaktsteifigkeitsfaktor in dieser Studie untersucht.

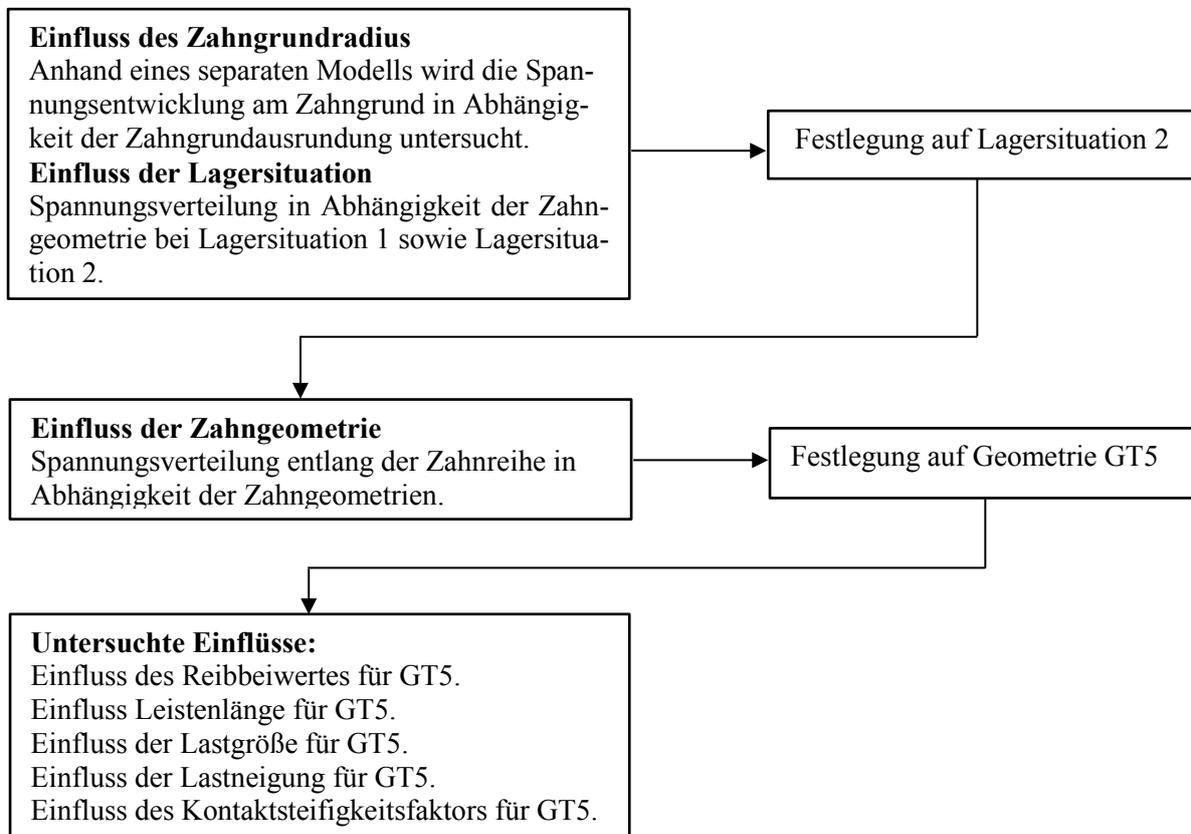


Abb. 3.23: Übersicht zur Parameteruntersuchung

Die Berechnung erfolgt geometrisch nichtlinear und physikalisch nichtlinear. Dabei wird ein multilinesares Werkstoffgesetz verwendet.

3.7.3 Einfluss des Zahngrundradius

Anhand der Geometrie GT1 wird der Einfluss des Zahngrundradius auf die Spannungsentwicklung in der Ausrundung untersucht. Das verwendete zweidimensionale FE-Modell hat eine Verzahnungslänge $L = 124\text{mm}$, eine Zahnleistenhöhe $H_1 = 30\text{mm}$ und eine Zahnleistentiefe $T = 20\text{mm}$. Die Zahnleiste wird mit 78 kN unter 45° und 55° sowie mit 55 kN unter 45° belastet. Die Belastung wird dabei als konstante Flächenlast auf die Oberkante der oberen Leiste aufgegeben. Die Lagerung erfolgt nach Lagersituation 1. Jede Zahnleiste hat 14 Stahlzähne. Die Kraftübertragung erfolgt über den Kontakt der Stahlzähne. Der Reibbeiwert beträgt $0,15$ und der Kontaktsteifigkeitsfaktor ist 2 .

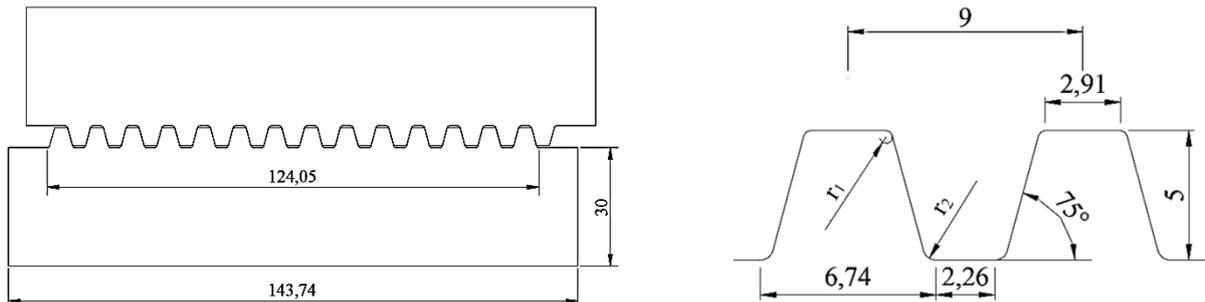


Abb. 3.24: Geometrie des Modells der Radienstudie nach (Vogt, Müller 2016)

Tab. 3.5: Radienstudie

r1	0,5	0,7	0,9	1,1	1,3	1,5	1,7	1,9
r2	0,35	0,49	0,63	0,77	0,91	1,05	1,19	1,33

Die Radienänderung ist nicht proportional zur Spannungsabnahme (Abb. 3.25). Je größer der Radius wird, desto weniger große Vergleichsspannungsänderungen sind zwischen den benachbarten Radien zu beobachten. Um einerseits die Spannungen im Zahngrund möglichst gering zu halten, andererseits den Zahnabstand und somit das Toleranzmaß nicht zu groß zu gestalten, wird bei einer Zahnhöhe von 5 mm ein Zahngrundradius von etwa 1 mm gewählt. Da bei Lagersituation 1 die Vergleichsspannungen im Zahngrund zwischen dem ersten und dem zweiten Zahn maximal sind, wird diese Studie nicht mit Lagersituation 2 wiederholt, sondern auf die vorhandenen Ergebnisse zurückgegriffen.

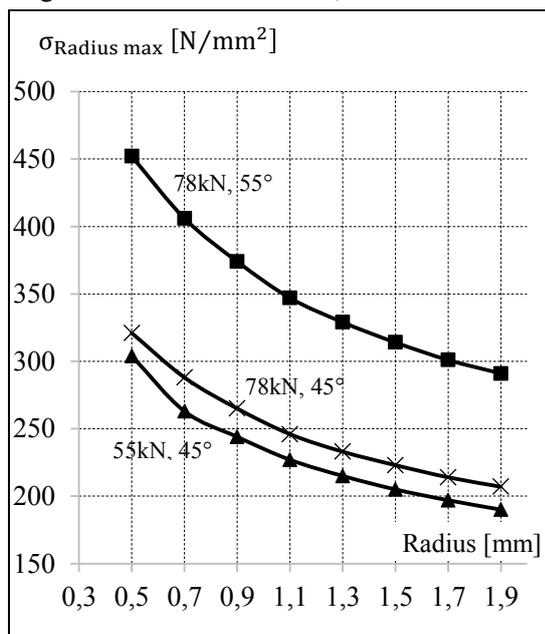


Abb. 3.25: Ergebnisse der Parameterstudie zu den Zahngrundradien

3.7.4 Spannungsverteilung in Abhängigkeit der Zahngeometrie bei Lagersituation 1

Parameter der Studie:

Anhand eines zweidimensionalen FE-Modells mit einer Verzahnungslänge $L = 290\text{mm}$, einer Zahnleistenhöhe $H_1 = 30\text{mm}$ und einer Zahnleistentiefe $T = 20\text{mm}$ werden die entworfenen Zahngeometrien (Tab. 3.3) hinsichtlich der Spannungsverteilung untersucht. Es wird die Lagersituation 1 verwendet. Die Zahnleiste wird mit einer Vertikallast sowie Horizontallast von 100kN unter einem Kraftangriffswinkel $\theta = 45^\circ$ belastet. Die Kraft wird als konstante Flächenlast auf die Oberseite der oberen Zahnleiste angesetzt. Die Kraftübertragung erfolgt über Kontakt in der verzahnten Fuge. Es wird der Kontaktsteifigkeitsfaktor 2 und der Reibbeiwert $\mu = 0,15$ angesetzt. Die Anzahl der Zähne wird je nach Zahngeometrie variiert, die Verzahnungslänge beträgt 290mm (Tab. 3.6). Mit Geometrie DT5 können 84 Zähne auf der Länge L angeordnet werden, mit Geometrie GT4 nur 26 Zähne. Die Zahnanzahl der weiteren Geometrien liegt dazwischen.

Tab. 3.6: Übersicht Studie: Zahngeometrie mit gleitender Lagerung (Lagerung 1)

Studie: Zahngeometrie mit gleitender Lagerung (Lagerung 1)													
Bezeichnung	GD1	GD2	GD3	GD4	GR1	GR2	GT1	GT2	GT3	GT4	GT5	GT6	GT7
Zahnanzahl	17	45	29	29	29	29	32	29	26	42	84	58	58

Ergebnisse zu den Spannungen bei Lagersituation 1:

Da die Tangentiallast allein über die Stirnseite der Zahnleiste abgetragen wird, verhält sich diese analog einer Schraubverbindung. Die ersten drei bis sechs Zähne erhalten den Großteil der Last, während alle weiteren Zähne nur einen geringfügigen Lastanteil abtragen (Abb. 3.26). Auch Xu et. al. (2014) zeigt in einer verzahnten Stahlverbindung diese Art von Lastabtrag. Dieses Verhalten ist bei allen Geometrien zu beobachten.

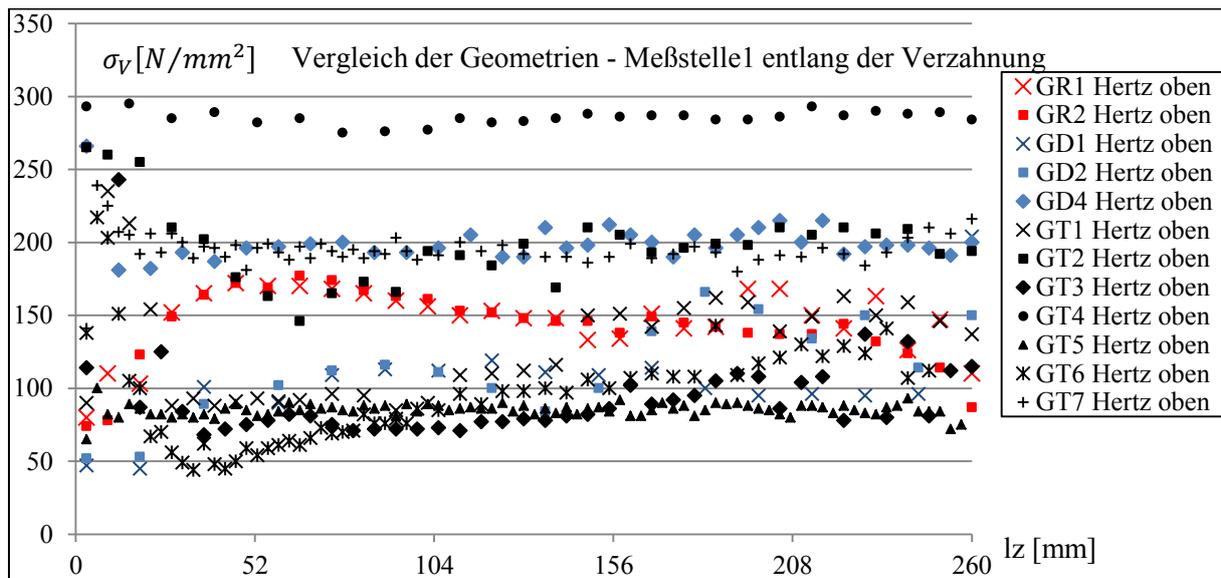


Abb. 3.26: Spannungsverteilung an den Zähnen in Abhängigkeit der Geometrie bei Lagersituation 1 exemplarisch an Messbereich 1 (weitere Messbereiche siehe Anhang A)

In einem ersten Schritt wird die Zahnleiste ohne Ausrundungen des Zahngrundes und der Zahnspitze in einer FE-Analyse untersucht (Abb. 3.27 links). Im Bereich des nicht ausgerundeten Zahngrundes entstehen Spannungsspitzen. In diesen Bereichen treten frühzeitig Plastifizierungen des Materials auf. Der Zahngrund wird in den Modellen GD2 bis DG4 ausgerundet. Dadurch nimmt die Größe der Spannungen an der Singularitätsstelle ab. Numerisch wird durch die Ausrundungen ein stabilerer Rechenlauf erreicht. In der Realität können kleine Ausrundungen auch durch Plastifizieren erreicht werden. Das Phänomen ähnlich der Hertz'schen Pressungen an der Zahnflanke tritt auf, wenn der Zahnkopf eine größere Ausrundung hat als der Zahngrund und somit in diesem Bereich kein Kontakt vorhanden ist (Abb. 3.27 mitte).

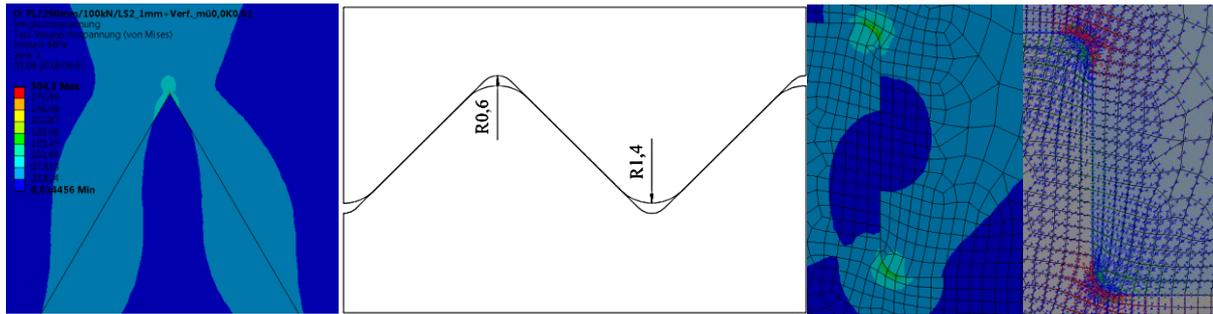


Abb. 3.27: Spannungsspitzen am nicht ausgerundeten Zahngrund (links); Ausrundungen am Zahnkopf und Zahnfuß (mitte); Vergleichsspannung und Spannungsvektoren der ausgerundete Recheckverzahnung GR2 (rechts)

Neben dem Dreieck ist das andere Extrem das Rechteck. Deshalb wird eine Rechteck-Verzahnung ohne Ausrundungen (R1) und mit Ausrundungen (R2) untersucht. Hier zeigt sich, dass die vertikal verlaufenden Flanken geringe Spannungen ertragen müssen, die Eckbereiche hingegen sehr große Spannungen. Der Grund hierfür ist, dass die an der Zahnflanke angreifenden Spannungsvektoren unter dem Winkel $\xi > 90^\circ$ auftreffen und nur die Horizontalkomponente über die Zahnflanke übertragen wird (Abb. 3.27 rechts). Im Bereich der Ausrundungen hingegen können sich die Spannungsvektoren im rechten Winkel abstützen. Das Trapez besteht aus Komponenten der Rechteck- und der Dreieckgeometrie. Dieses wird in den Geometrien GT1 bis GT7 untersucht. Für die Lagersituation 1 zeigt sich bei der Trapezgeometrie kein nennenswerter Vorteil bei der Spannungsverteilung. Dies liegt an der bereits angesprochenen Lastkonzentration im Bereich der horizontalen Lagerung.

3.7.5 Spannungsverteilung in Abhängigkeit der Zahngeometrie bei Lagersituation 2

Analog zur Studie mit Lagersituation 1 wird nun die Lagersituation 2 untersucht. Dabei bleiben alle Parameter unverändert.

Einfluss der Lagersituation

Die Spannungsverteilung bei der Lagersituation 1 unterscheidet sich deutlich von der Lagersituation 2 (Abb. 3.28). Mit der Stahlzahnleiste kann das unter 3.7.4 beschriebene Verhalten (Spannungsverteilung, Tragverhalten) der Lagersituation 1 analog zum Schraube-Mutter-Kontakt gezeigt werden. Jedoch ist die Lagersituation 1 für die eingebettete Zahnleiste und somit für die Verbindung keine realistische Lagerung. Der Einbau der Zahnleiste entspricht i.d.R. der Lagersituation 2. Deshalb wird diese in den weiteren Betrachtungen verwendet.

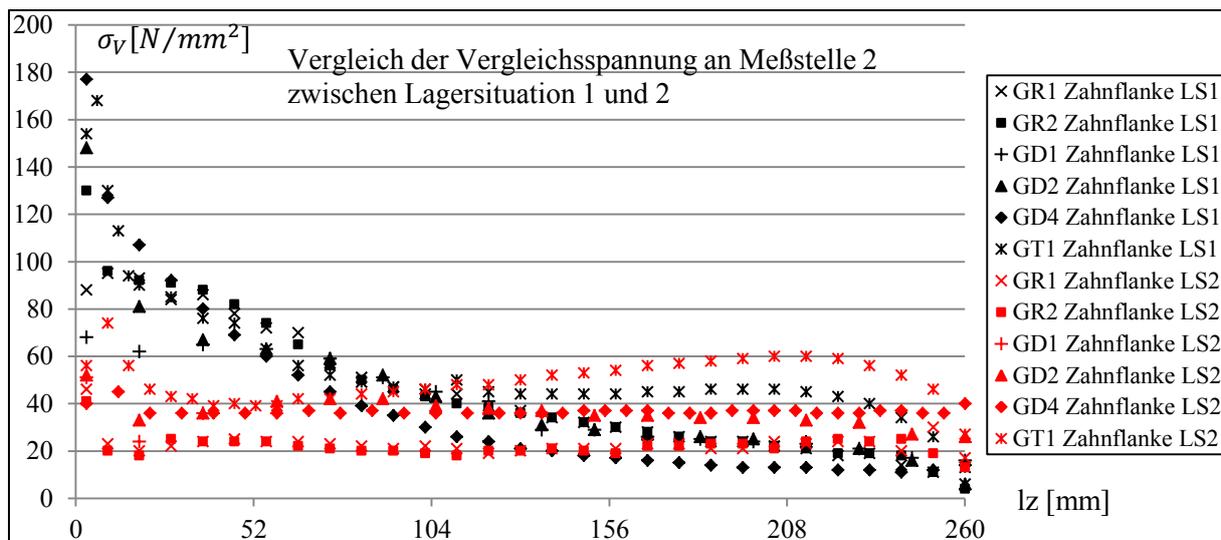


Abb. 3.28: Vergleich der Normalspannungen an der Zahnflanke zwischen Lagersituation 1 und 2

Lagersituation 2 zeigt einen deutlich gleichmäßigeren Lastabtrag über die Zahnleiste, da hier die horizontalen Kräfte über die gesamte Länge der unteren Zahnleiste aufgenommen werden (Abb. 3.28). Die

Stirnseite beteiligt sich nicht am Lastabtrag. Diese Studie zeigt, dass die Spannungsverteilung in der Zahnleiste maßgebend von der Lagerung abhängt und das bei der verwendeten Lagerung (betonseitige Verzahnung entspr. Lagersituation 2) keine Spannungsspitzen wie beim Schraube-Mutter-Kontakt auftreten. Die Lagersituation 2 bildet das realistischere Verhalten der Zahnleiste ab.

Einfluss der Zahngeometrie und der Zahnhöhe

Für die Spannungsverteilung ist nicht allein die Zahngeometrie sondern auch die Zahnhöhe entscheidend. Dreieckige Zähne werden mit flacher Zahnneigung sehr gedrunen und somit sehr breit. Bei steiler Zahnneigung werden dreieckige Zähne sehr schlank bzw. hoch. Gedrungene Zähne sind hinsichtlich der Verformungen robust, jedoch ist eine flache Zahnflankenneigung sehr anfällig hinsichtlich des Gleitens bei geringem Kraftneigungswinkel β . Werden dreieckige Zähne mit einer steilen Zahnneigung ausgeführt, so verlieren sie an Robustheit, da sie sich sehr stark verformen. Um die Zähne nicht überwiegend auf Biegung zu beanspruchen, sollte bei dreiecksförmigen Zähnen eine Zahnflankenneigung $\alpha_z = 70^\circ$ nicht überschritten werden. Bei rechteckigen Zähnen ist die Robustheit vom Verhältnis der Zahnhöhe zur Zahngrundlänge abhängig. Die Geometrie sollte quadratisch sein (Verhältnis 1 zu 1). Dann sind die Zähne ausreichend robust. Aufgrund der schwierigen Einbausituation von rechteckigen Stahlzähnen stellt diese Betrachtung eine Grenzbetrachtung dar. Die trapezförmigen Zähne sollen die Vorteile der dreiecksförmigen und der rechteckigen Stahlverzahnung nutzen. Durch die Zahnneigung erfolgt ein möglichst optimaler Kraftangriff und aufgrund der Trapezform wird ein robustes Tragverhalten erreicht. Das grundsätzliche Verhalten, wie sich die Spannungen am Zahn abbilden, ist zu den Beschreibungen aus Lagersituation 1 identisch. Der Unterschied in Lagersituation 2 ist die gleichmäßigere Verteilung der Spannungen.

Die Zahngeometrie und auch die Zahnhöhe haben Einfluss auf die mögliche Anzahl der Zähne, die auf eine bestimmte Verzahnungslänge L angeordnet werden können. Bei definierter Verzahnungslänge L von 290 mm können mit der *Geometrie GT5* 84 Zähne verwendet werden. Geometrie *GT3* bringt mit 26 Zähnen die geringste Zahnanzahl auf der Leiste unter. Dies hat Auswirkung auf die Spannungsverteilung, was sich bei gleicher Geometrie mit skalierten Größenveränderung zeigt. *GT5* hat dieselbe Geometrie wie *GT3*, wird jedoch in beide Richtungen mit dem Faktor 0,5 skaliert. D. h. die Abmessungen von *GT5* sind halb so groß wie die von *GT3*. Demzufolge verteilt sich die Last bei *GT 5* auf die doppelte Anzahl an Zähnen. Bei den Messbereichen 1 und 3 ist der Spannungsverlauf bei allen Geometrien weitgehend gleichmäßig. (Abb. 3.29) Bei den Spannungen am Zahngrund (Messbereich 4) stellt sich bei einer größeren Zahnanzahl ein gleichmäßigeres Spannungsbild ein (vgl. Abb. A1.9 bis A.1.12).

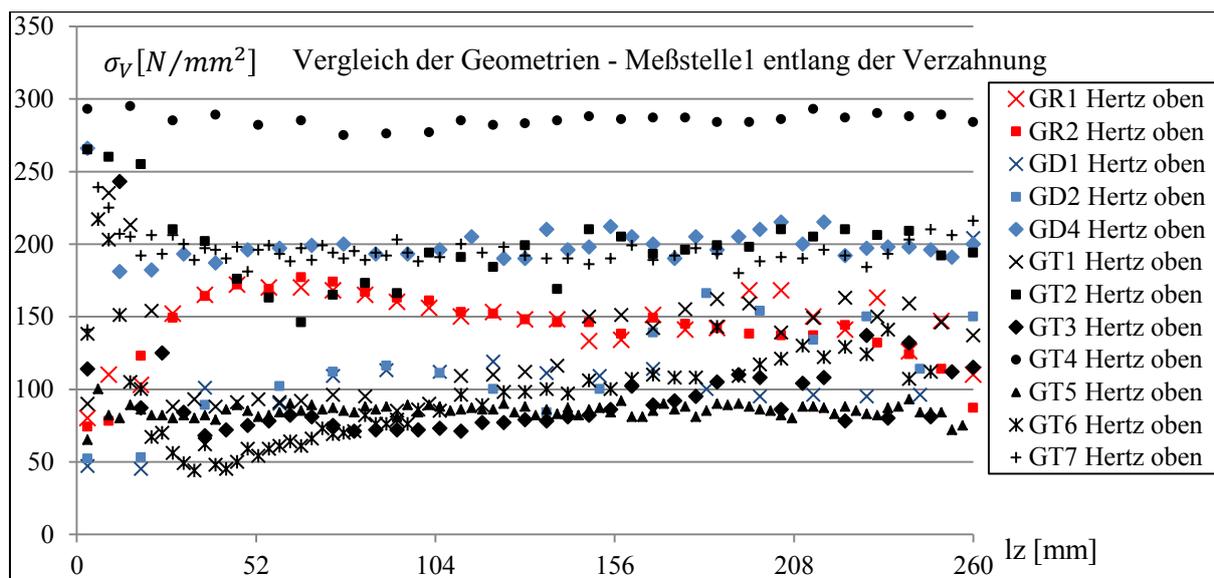


Abb. 3.29: Vergleichsspannung an Messstelle 1 in Abhängigkeit der Geometrie bei Lagersituation 2

Die Geometrie *GT5* zeigt entlang der Verzahnung eine gleichmäßige Spannungsverteilung an allen vier Messbereichen (Abb. 3.30). Die Vergleichsspannungen sind zudem verglichen mit jenen der anderen Geometrien relativ gering. Durch den Zahnflankenneigungswinkel von 70° , ist die Geometrie

günstig in Bezug auf den stabilisierenden Bereich des Kraftangriffs (vgl. Abb. 3.9). Des Weiteren können mit dieser Geometrie Toleranzen sehr genau ausgeglichen werden. Aufgrund der kleinen Abmessungen der Zähne ist das maximale Maß der Abweichung 1,8mm. Aufgrund dieser Vorteile wird diese Geometrie für weitere FE-Untersuchungen verwendet.

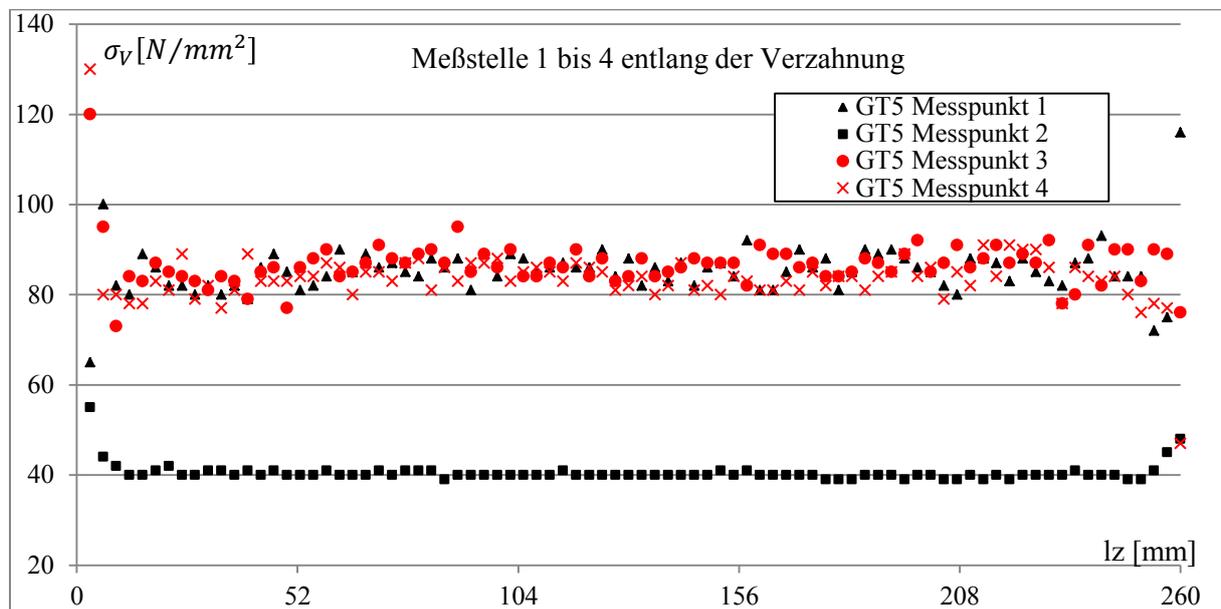


Abb. 3.30 Vergleichsspannung an Messstelle 1 in Abhängigkeit der Geometrie bei Lagersituation 2

Einfluss des Reibbeiwertes

In der Literatur wird der Reibbeiwert zwischen zwei trockenen Stählen mit $\mu = 0,15$ angegeben (vgl. Bobeth 1993). Für Konstruktionen im Traggerüstbau wird ein Reibbeiwert $\mu = 0,20$ genannt (FB Univ. Karlsruhe 1977). Um den Einfluss der Reibung auf die Spannungsverteilung der Zahnleiste einschätzen zu können, wird die Geometrie GT 5 diesbezüglich untersucht.

Auf der Verzahnungslänge von 290mm sind 84 Zähne je Zahnleiste angeordnet. Die Zahnleiste ist mit Lagersituation 2 modelliert und durch eine konstante Flächenlast in der Größe $F_v = F_H = 100kN$ und somit unter 45° belastet. Der Kontaktsteifigkeitsfaktor beträgt 2. Es wird der Reibbeiwert $\mu=0,0, 0,15$ und $0,2$ variiert. Die Spannungen verteilt über die Zahnleisten nehmen mit zunehmendem Reibbeiwert ab. Das wird mit einer gleichmäßigeren Spannungsverteilung in der Zahnleiste und insbesondere im Bereich der Zähne begründet. Die Vergleichsspannung verringern sich sowohl an Messbereich 1 als auch an Messbereich 3 im Mittel um 27 % bei Veränderung des Reibbeiwertes $\mu = 0,0$ zu $\mu = 0,15$. Die Vergleichsspannungen an der Zahnflanke nehmen im Mittel um etwa 18% ab, die im Zahngrund um etwa 23%. Bei Veränderung des Reibbeiwertes von $\mu = 0,15$ zu $\mu = 0,20$ verändern sich die Spannungen im Vergleich zu $\mu = 0,15$ nur im mittleren Bereich der Zahnleiste um etwa 5% (Abb. 3.31 u. Abb. 3.32).

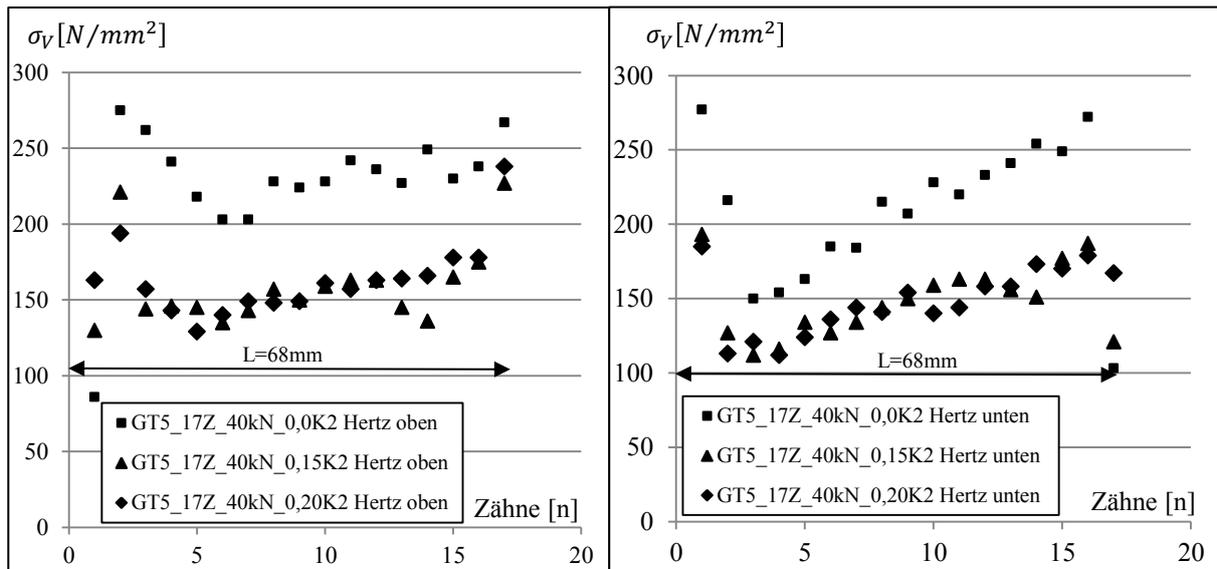


Abb. 3.31: Einfluss des Reibbeiwertes auf die Vergleichsspannungen am Messbereiche 1 (links) und Messbereich 3 (rechts)

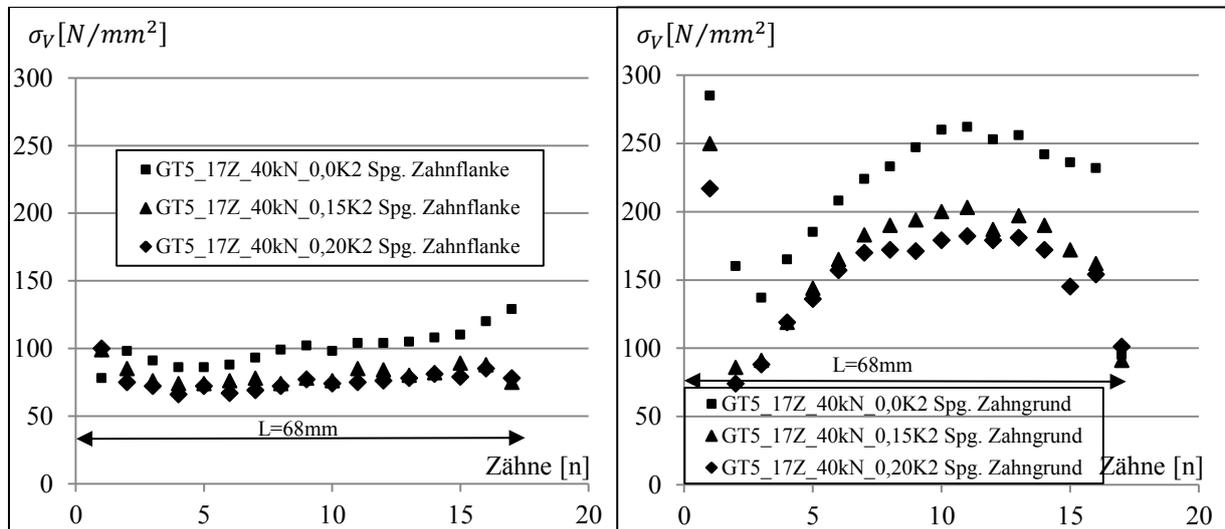


Abb. 3.32: Einfluss des Reibbeiwertes auf die Vergleichsspannungen am Messbereiche 2 (links) und Messbereich 4 (rechts)

Hinsichtlich der Spannungskonzentrationen stellt der reibungsfreie Kontakt den ungünstigsten Fall da. Durch Aktivierung von Reibung in der Kontaktfuge werden die Spannungen vergleichmäßigt, wodurch sich kleinere Spannungsspitzen ergeben.

Einfluss der Verzahnungslänge (der Zahnanzahl)

Ausgehend von einer konstanten Last wird untersucht, wie sich die Spannungen bei verändernder Verzahnungslänge verhalten. Die Resultierende der konstanten Flächenlast auf der Zahnleiste hat die Größe $F_V = F_H = 50\text{kN}$. Der Kontaktsteifigkeitsfaktor beträgt 2 und der Reibbeiwert 0,15. Die Anzahl und damit die Verzahnungslänge werden variiert. Es werden 84 Zähne auf einer Verzahnungslänge von 290mm, 42 Zähne auf 154mm und 17 Zähne auf 68mm platziert.

Je länger die Verzahnungslänge, desto gleichmäßiger verteilt sich die Spannung (Abb. 3.33). Dieses Verhalten zeigt sich an jedem Messbereich. Sieht man von der Unregelmäßigkeit der kürzeren Verzahnungen ab, ist die Spannung umgekehrt proportional zur Zahnanzahl und damit zur Leistenlänge. Die Spannungen verdoppeln sich bei Veränderung der Zahnanzahl von 84 Zähnen auf 42 Zähne. Ebenso erhöhen sich die Spannungen wiederum um den Faktor von etwa 2,5 bei Veränderung der Zahnanzahl von 42 Zähnen auf 17 Zähne.

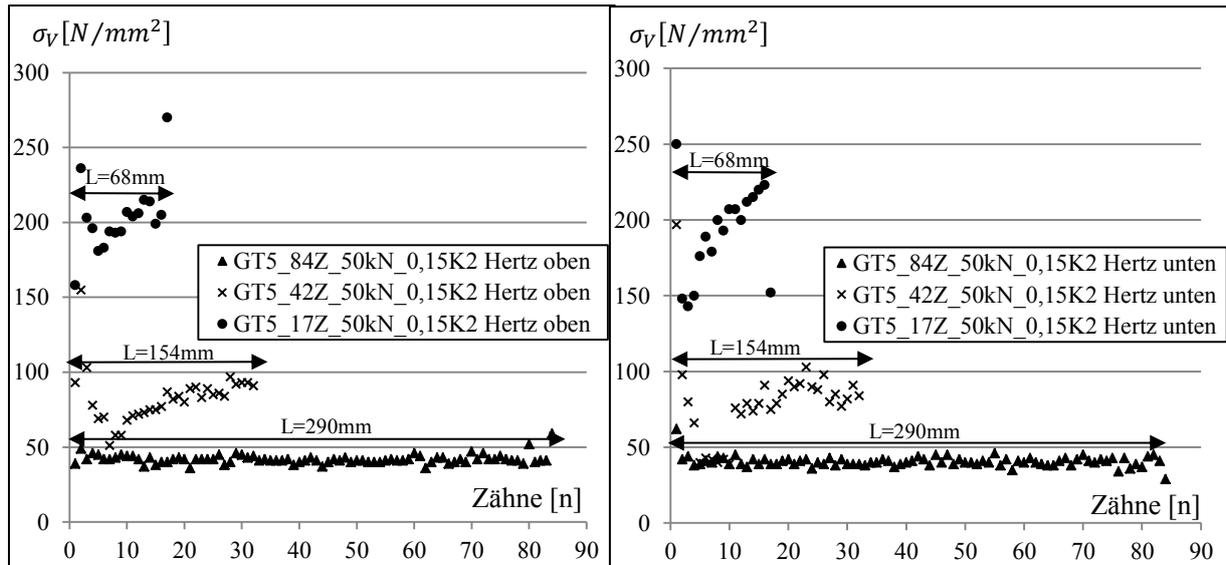


Abb. 3.33: Einfluss der Verzahnungslänge auf die Spannungen an Messbereich 1 (links) und Messbereich 3 (rechts)

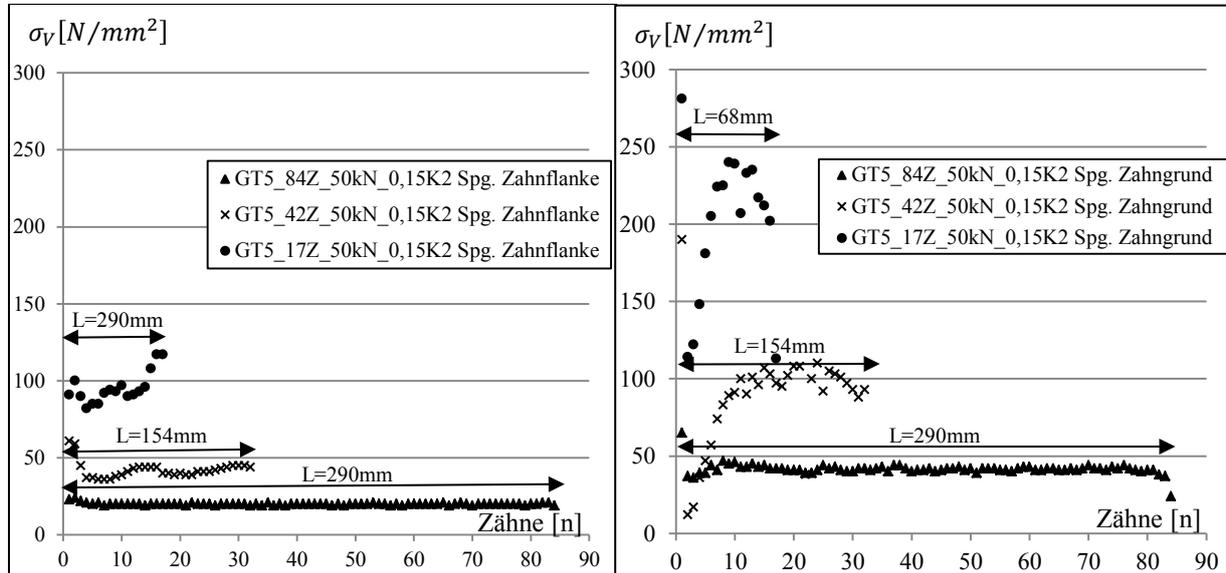


Abb. 3.34: Einfluss der Verzahnungslänge auf die Spannungen an Messbereich 2 (links) und Messbereich 4 (rechts)

Einfluss der Lastgröße

An einer Zahnleiste mit 84 Zähnen auf einer Verzahnungslänge von 290mm und an einer Zahnleiste mit 17 Zähnen auf einer Verzahnungslänge von 68mm werden die Lasten variiert. Dabei wird der Kraftneigungswinkel θ mit 45° gleich gelassen. Die Kräfte betragen bei der Zahnleiste mit 84 Zähnen $F_V = F_H = 50\text{kN}$, 100kN , 500kN und bei der Zahnleiste mit 17 Zähnen 20kN , 40kN , 50kN . Der Kontaktsteifigkeitsfaktor beträgt 2 und der Reibbeiwert 0,15.

Im elastischen Bereich sind die Spannungen an allen vier Messbereichen proportional zur einwirkenden Last (Abb. 3.35, rot dargestellt). Durch das Plastifizieren der Zähne vergleichmäßigen sich die Spannungen, sodass die Vergleichsspannungen nicht proportional zur Krafterhöhung ist, sondern darunter liegen (Abb. 3.35, schwarz dargestellt).

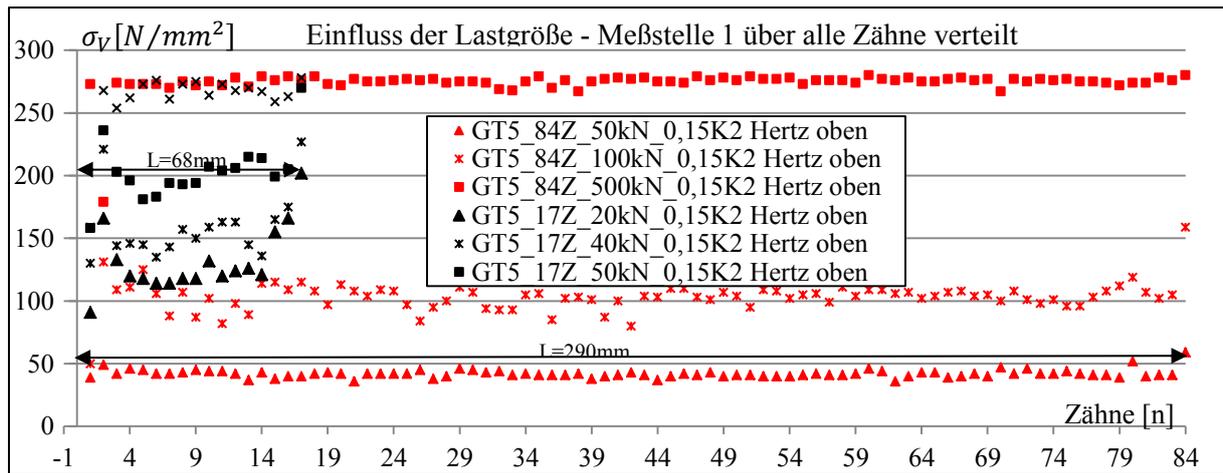


Abb. 3.35: Einfluss der Lastgröße – exemplarisch für Messbereich 1 (weitere Messbereiche im Anhang A)

Einfluss der Lastneigung

In den vorangegangenen Studien wird der Kraftneigungswinkel mit $\beta = 45^\circ$ (β vgl. Abb.3.21) betrachtet, in der hier aufgeführten Studie variiert dieser nun. Es wird die einwirkende Kraft 80 kN als Referenz unter $\beta = 45^\circ$ sowie ein unterer Wert mit $\beta = 20^\circ$ und ein oberer Wert mit $\beta = 70^\circ$ untersucht. Das verwendete FE-Modell hat 42 Zähne auf einer Verzahnungslänge von 154mm. Der Kontaktsteifigkeitsfaktor beträgt 2 und der Reibbeiwert 0,15. Bei sehr flachem Lastangriff (hier $\beta= 20^\circ$) erhöhen sich die Vergleichsspannungen im mittleren Bereich entlang der Verzahnung oberhalb der Zähne (Schnitt 1) (Abb. 3.36 bis 3.38). Greift die Last unter einem Winkel $\beta= 45^\circ$ an, so sind die Vergleichsspannungen nahezu konstant entlang der Verzahnungslänge. Unter einem Lastangriffswinkel von $\beta= 70^\circ$ sind die Vergleichsspannungen ebenfalls konstant, steigen jedoch am Anfang und am Ende der Zahnreihe an. Die über die Zahnleiste gemittelten Vergleichsspannungen steigen mit kleiner werdenden Winkel β an. Unter einem sehr steilen Winkel (hier $\beta=70^\circ$) zeigt sich eine homogene Spannungsverteilung im gesamten Zahnleistenbereich. An den Zähnen und insbesondere im Zahngrund zeigen sich Spannungserhöhungen am Anfang und am Ende der Zahnreihe bei allen drei Lastangriffswinkeln.

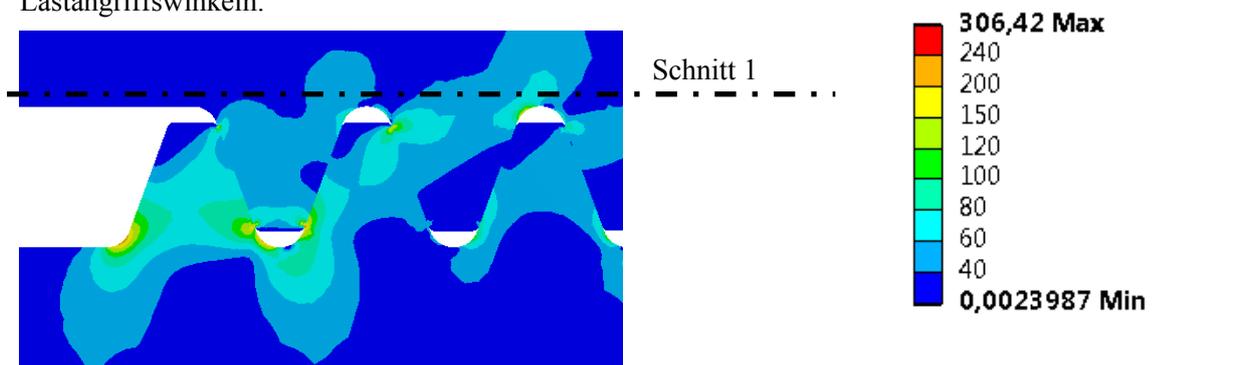


Abb. 3.36: Schnitt 1 zum Ablesen des Vergleichsspannungsverlaufs (links) und Farbskala für die Abb. 3.35 u.3.36 in N/mm^2 (links)

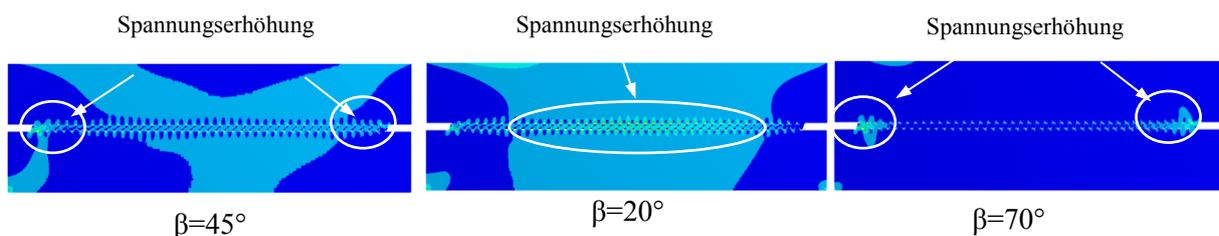


Abb. 3.37: Vergleichsspannungen in Abhängigkeit des Lastneigungswinkels β

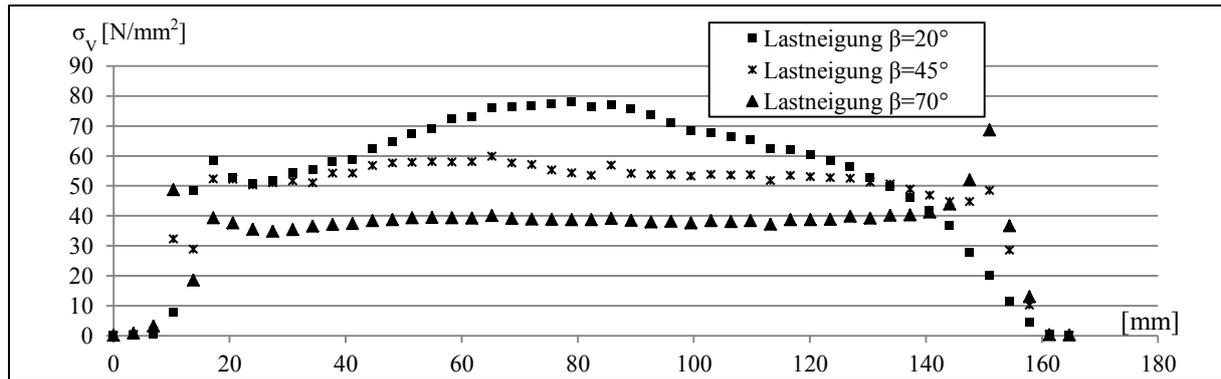


Abb. 3.38: Vergleichsspannungsverteilung in Schnitt 1 in Abhängigkeit der Kraftneigung

Einfluss des Kontaktsteifigkeitsfaktors

Da der Berechnungslauf und die daraus resultierenden Spannungen auch von der Kontaktsteifigkeit abhängig sind, wird dieser Einfluss für die Zahngeometrie GT5 an der Zahnleiste mit 17 Zähnen an einer Verzahnungslänge von 68mm untersucht. Dabei wird der Kontaktsteifigkeitsfaktor 1 und 2 sowie 0,2 untersucht. Da der Kontaktsteifigkeitsfaktor zwischen zwei Stahlflächen mit 1 bzw. größer 1 empfohlen wird, dient der Wert 0,2 nur als Vergleichswert bzw. untere Grenze. Alle Berechnungen werden sowohl reibungsfrei als auch reibungsbehaftet mit einem Reibungsbeiwert $\mu = 0,15$ durchgeführt. Die Belastung beträgt $F_v = F_H = 40\text{kN}$.

Die Vergleichsspannungen der reibungsbehafteten Berechnungen zeigen bei Kontaktsteifigkeitsfaktor 1 und 2 sehr geringe Abweichungen (Abb. 3.39). Beim reibungsfreien Kontakt gilt das ebenfalls im Bereich der Zahnflanke. Im Bereich der Messbereiche 1 und 3 liegen die Spannungsunterschiede bei unter 15 % und beim Zahngrund unter 5 %. Die Spannungsverteilungen der Berechnungen mit Kontaktsteifigkeitsfaktor 0,2 weichen nicht nennenswert vom Verlauf derer mit dem Faktor 1 und 2 ab. Für weitere Berechnungen wird ein Kontaktsteifigkeitsfaktor nahe der 1 angestrebt.

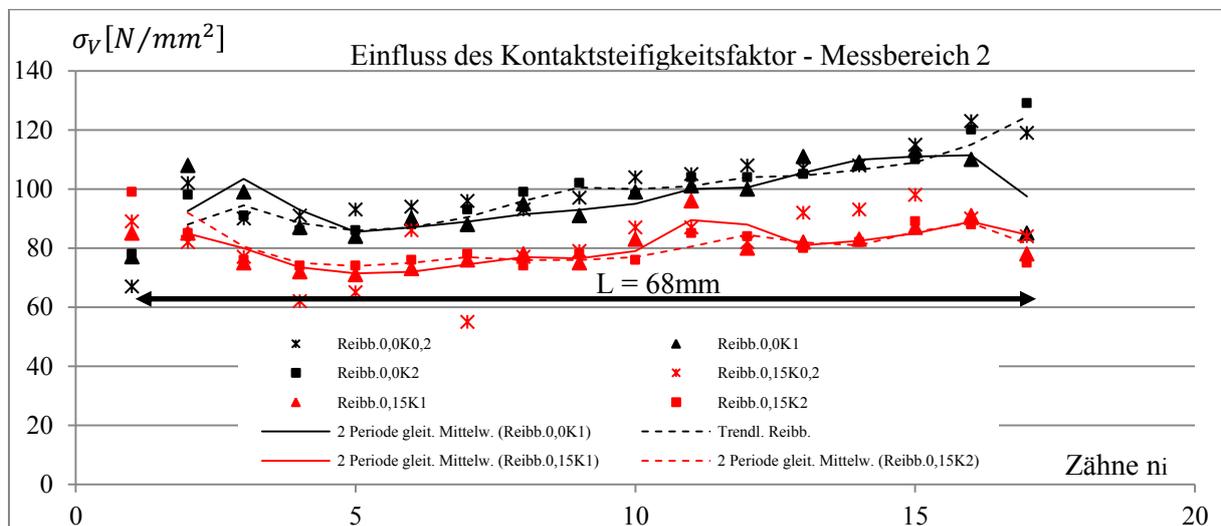


Abb. 3.39: Einfluss des Kontaktsteifigkeitsfaktors exemplarisch am Messbereich 1

3.7.6 Numerische Betrachtung der Hertz'schen Pressungen

Hertz'sche Pressungen an der Zahnleiste:

Die numerischen Berechnungen zeigen im Kontaktbereich der Zahnflanken zwei ausgeprägte Spannungsspitzen. An diesen Stellen kommt es zum Phänomen ähnlich der Hertz'schen Pressungen.

Simulation des Hertz'schen Kontakt am einfachen Modell:

Um die Genauigkeit der Hertz'schen Pressungen in der numerischen Berechnung abschätzen zu können, werden diese in einer Parameterstudie untersucht. Dabei wird an einem einfachen zweidimensionalen Modell der Kontakt *Zylinder auf Ebene* numerisch abgebildet und mit der analytischen Berech-

3. Entwicklung der Stahlzahngeometrie

nung verglichen (Abb. 3.40). Der Kreischnitt des Zylinders wird mit einem Radius $r=10\text{mm}$ und $r=20\text{mm}$ abgebildet. Die Lastaufgabe erfolgt ausgehend von 5kN mit Lastschritten von 1kN bis 20kN sowie darüber hinaus in größeren Lastschritten ($30, 40, 50, 60, 70, 100, 200\text{kN}$). Das E-Modul wird zu 200.000 N/mm^2 angesetzt. Es wird mit einer Netzgröße $0,2\text{mm}$ gerechnet.

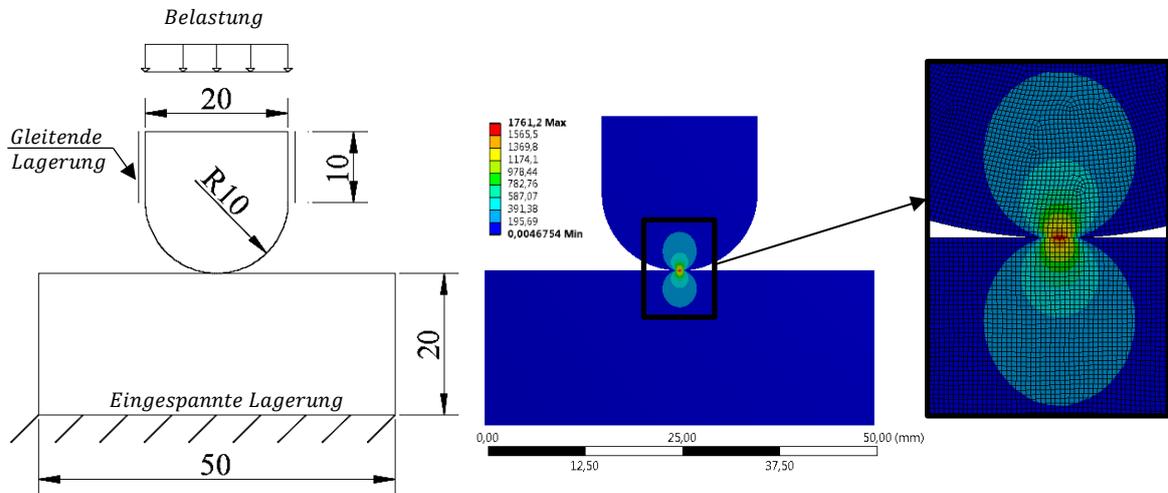


Abb. 3.40: System mit Belastung (links); Darstellung FE-Modell und Hertz'sche Pressung (rechts)

Zwischen der FE-Rechnung und der analytischen Berechnung entsteht die Abweichung $\Delta\sigma$. Die Abweichung in Prozent, bezogen auf den analytisch berechneten Wert, wird mit zunehmender Last geringer und damit der Fehler zur analytischen Berechnung immer kleiner (Abb. 3.41).

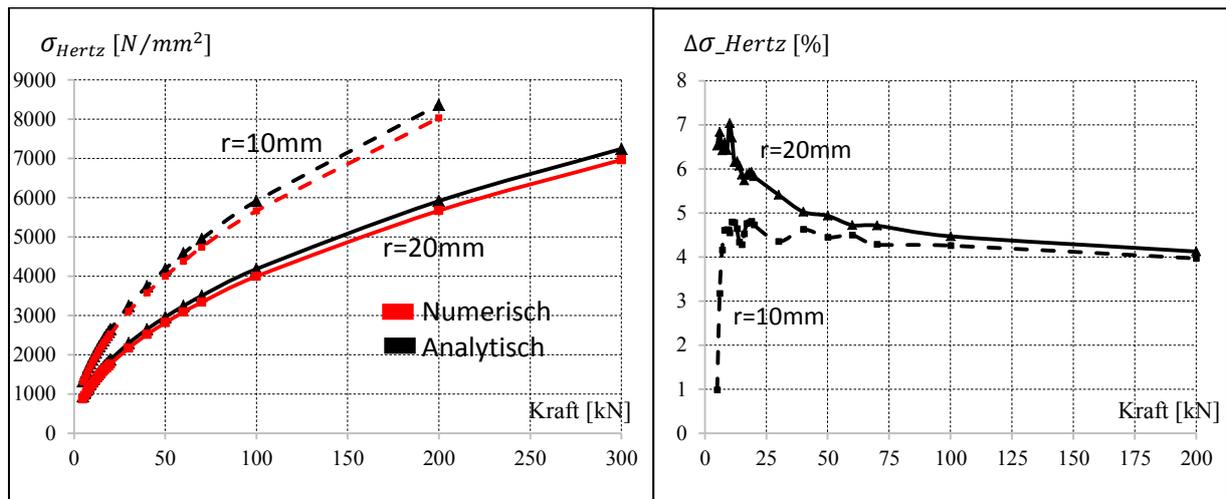


Abb. 3.41: $\Delta\sigma$ in Abhängigkeit der Belastung für $r=10$ u. 20mm in N/mm^2 und in %

Die Ergebnisse beider Radienstudien nähern sich dem Wert 4% an. Berechnungen mit 300kN und 500kN zeigen, dass der Fehler noch kleiner (gegen $3,5\%$) wird. Die Studie zeigt grundsätzlich eine gute Übereinstimmung der FE-Berechnung mit den analytisch gerechneten Werten. Abweichungen liegen in der Größenordnung von unter 4% . In der Zahnleistsimulation auftretende Spannungspitzen werden auch unter dem Gesichtspunkt der Hertz'schen Pressungen bewertet.

Zulässige Hertz'sche Pressungen:

Der Werkstoff Stahl kann im Bereich von Hertz'schen Pressungen über die normale maximal erträgliche Spannung belastet werden. Folgend sind die maximal erträglichen Spannungen von Baustahl aufgelistet und in dynamische / statische Belastungen unterteilt (Tab. 3.7).

Tab. 3.7: Maximal ertragbare Hertz'sche Pressung (Schaeffler Technologies AG & Co. KG)

Werkstoff	Werkstoff-Nr.		Hertz'sche Pressung		Streckgrenze des Werkstoffs
			$p_{H\ stat}$	$p_{H\ dyn}$	$R_{p0,2}$
			$\frac{N}{mm^2}$	$\frac{N}{mm^2}$	$\frac{N}{mm^2}$
Baustahl	St-37-2	10.037	690	340	235
	St-44-2	10.044	860	420	275
	St-52-3	10.570	980	480	355

3.7.7 Zusammenfassung und Stahlzahngeometrie für die weitere Bearbeitung

In zweidimensionalen FE-Untersuchungen werden die Vergleichsspannungen in der Zahnleiste bzw. in den einzelnen Zähnen untersucht. Die Berechnungen erfolgen geometrisch nichtlinear und physikalisch nichtlinear. Mithilfe einer Vergleichsspannungsanalyse werden an vier Messbereichen (Abb. 3.22) je Zahn die Werte gemessen und daran die einzelnen Parameter unter verschiedenen Einflüssen miteinander verglichen.

Die Geometrie GT5 zeigt entlang der Verzahnung eine gleichmäßige Spannungsverteilung an allen vier Meßbereichen. Die Vergleichsspannungen sind zudem, verglichen mit jenen der anderen Geometrien, relativ gering. Durch den Zahnflankenneigungswinkel von 70° , ist die Geometrie günstig in Bezug auf den stabilisierenden Bereich des Kraftangriffs (vgl. Abb. 3.9). Des Weiteren können mit dieser Geometrie Toleranzen sehr genau ausgeglichen werden. Aufgrund der kleinen Abmessungen der Zähne ist das maximale Maß der Abweichung 1,8mm. Aufgrund dieser Vorteile wird diese Geometrie für weitere FE-Untersuchungen verwendet.

3.8 Versuche an Stahlprismen mit gezahnter Kontaktfläche

Ziel ist die lokale Untersuchung der Stahlverzahnung unter einem Kraftangriffswinkel θ . Es wird das Last- und Verformungsverhalten von Stahlprismen mit gezahnter schräger Grenzfläche untersucht.

3.8.1 Versuchsprogramm und Prüfkörper

Die Geometrie GT 5 hat sich ausgehend von der in Kapitel 3.7 durchgeführten analytischen Studie als am besten geeignet herausgestellt. Deshalb wird diese Geometrie im Folgenden experimentell untersucht. Zusätzlich werden zwei Stahlprismen mit der Geometrie GT7 hergestellt. Diese dient als Referenz. Außerdem wird ein erster Prototyp eines Zahnleistenpaares gefertigt (Tab. 3.9).

Tab. 3.8: Versuchsprogramm Phase I

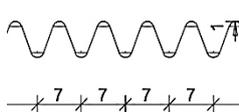
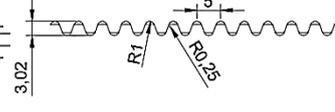
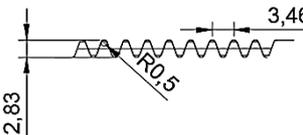
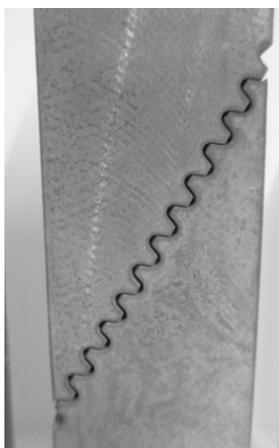
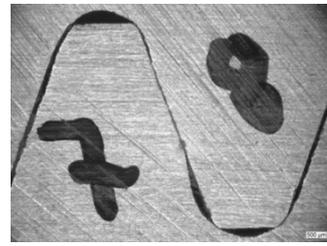
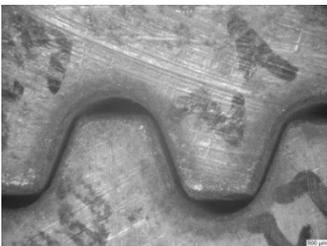
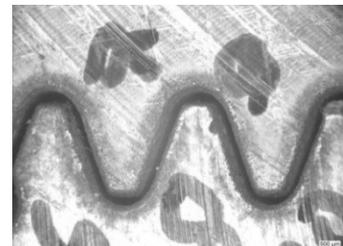
Versuchsnr.	GT	Zahnhöhe	Zahngrundlänge	Anzahl PK	Zahnanzahl	Fugenneigung	Abmessungen			Material S235
							b [mm]	t [mm]	h [mm]	
I/R	-	-	-	1	-	-	32	40	200	Charge 1
I/P1/2	5	2,8	3,5	2	17	30°	32	40	200	Charge 1
I/P3/4	7	3,0	5,0	2	12	30°	32	40	200	Charge 1
I/P5/6	5	2,8	3,5	2	17	20°	32	40	200	Charge 2
I/P7/8	5	2,8	3,5	2	17	25°	32	40	200	Charge 2
I/P9/10	5	2,8	3,5	2	17	45°	43	40	200	Charge 2
I/P11/12	5	2,8	3,5	2	17	50°	46	40	200	Charge 2
I/P13	5	2,8	3,5	1	17	70°	56	40	200	Charge 2
I/P14	5	2,8	3,5	1	17	90°	61	40	200	Charge 2

Der Versuchsaufbau besteht aus je zwei prismenförmigen Prüfkörpern, welche über eine gezahnte Fuge miteinander in Kontakt stehen (Abb. 3.45). Diese Fuge verläuft unter dem Winkel θ zur Vertikalen. Die Gesamthöhe des zusammengebauten Prüfkörpers beträgt 200 mm. Es werden die Winkel $\theta = 20^\circ, 25^\circ, 30^\circ, 45^\circ, 50^\circ, 70^\circ$ und 90° untersucht. Damit soll der Einfluss der Lastneigung festgestellt

3. Entwicklung der Stahlzahngeometrie

und untersucht werden. Die Zahnanzahl wird je Grenzfläche mit 17 Zähnen beibehalten. Damit verändert sich die Breite b des Stahlprismas (Tab. 3.8). Aufgrund der Zahnflankenneigung von $\alpha_z = 70^\circ$ stehen die Zahnflanken bei einem Lastangriff von 20° senkrecht zum Lastangriff. Jede steilere Neigung unter 20° würde ausschließlich durch Reibung gehalten werden. Damit stellt der Lastangriffswinkel $\beta = 20^\circ$ eine untere Grenze dar. Die 90° geneigte Fuge stellt die obere Grenze dar und kann auch als Referenzkörper betrachtet werden. Die Geometrie GT5 wird an zwei Prüfkörpern I/P1 und I/P2 mit 17 Zähnen je Grenzfläche untersucht. Damit ein Vergleich zu einer anderen Verzahnung vorliegt wird die Geometrie GT 7 mit ebenfalls zwei gleichen Prüfkörpern (I/P3 und I/P4) unter dem Winkel 30° getestet. Die Geometrie GT 7 ist gedrungener und somit gegenüber der Geometrie GT5 robuster hinsichtlich der Verformungen. Damit ein Abgleich mit der Geometrie GT 5 möglich ist, wird die Grundfläche der Prismen I/P3 und I/P4 gleich gelassen und die Zahnanzahl auf 12 reduziert. Um eine Referenz zum ungestörten Prisma zu erhalten, wird ein Referenzprisma mit den Abmessungen der 30° geneigten Prismen, jedoch ohne Fuge verwendet.

Tab. 3.9: Übersicht der Zahngeometrien von Prototyp und Prüfkörpern

Bezeichnung	Zahngeometrie GT3	Zahngeometrie GT7	Zahngeometrie GT5
Probekörper	Prototyp	Stahlprisma 3 und 4	Stahlprisma 1 und 2
Darstellung der Geometrie	 <p>Zahnhöhe 5,0mm Zahnabstand 7,3mm</p>	 <p>Zahnhöhe 3,02mm Zahnabstand 5,0mm</p>	 <p>Zahnhöhe 2,83mm Zahnabstand 3,46mm</p>
Bild der Verzahnungen			
Bild Genauigkeit 500µm			

Alle Prüfkörper werden aus einem Blech mit der Güte S235 hergestellt. Zur Ermittlung der Werkstoffkenndaten werden Zugproben angefertigt (vgl. Anhang B). Die Verzahnung wird durch Wasserstrahlschneiden hergestellt. Die Prüfkörper werden an den Kontaktflächen zur Prüfmaschine (Abb. 3.46) nachträglich geschliffen um eine möglichst konstante Lasteinleitung zu erreichen.

Der Prototyp sowie der Prüfkörper I/P1 bis I/P4 werden vermessen, um somit Aussagen zur Fertigungsgenauigkeit und den Toleranzen zwischen CAD-Zeichnung und gefertigter Verzahnung zu treffen. Es zeigt sich, dass die Fertigungsgenauigkeiten von der ZahngöÙe abhängig sind. Je kleiner die Zähne gefertigt werden, desto größer sind die Maßabweichungen.

Aufbereitung des Prototyps für die Vermessung der Stahlzähne:

Um die Fertigungsgenauigkeit des Prototyps sowie der Prüfkörper zu erfassen, werden diese mithilfe eines Stereomikroskop vermessen. Um eine ebene Oberfläche zu erhalten und die beim Wasserstrahl-schneiden entstandenen Kleinstradien am Randbereich zu entfernen, werden die Längsseiten der Zahn-leisten überfräst (Abb. 3.42).

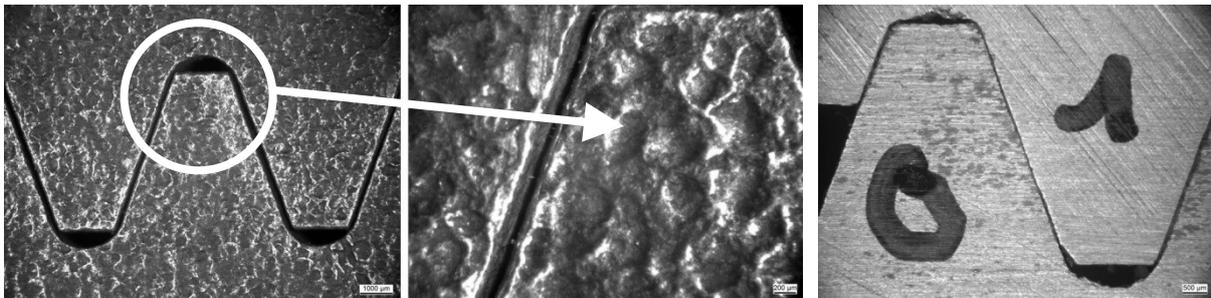


Abb. 3.42: Oberfläche des Prototyps vor (links u. mitte) und nach (rechts) dem Überfräsen

Nach dem Überfräsen bildet sich erneut ein kleiner Grad an den Fräsrändern. Dieser wird von Hand überschleift (Körnung Schleifpapier > 1000).

Vermessungsinstrument:

Für die Vermessung der Stahlzähne wird ein Stereomikroskop verwendet. Das ist ein Lichtmikroskop, das für beide Augen einen getrennten Strahlengang bereitstellt. Somit entsteht ein räumlicher Bildeindruck. Das Bild kann durch eine Hell- und Dunkelfeld-Durchlichtbeleuchtung an verschiedene Lichtverhältnisse angepasst und mithilfe der Software Image Access in einer Datenbank abgelegt werden. Diese Dateien werden digital vermessen. Die Genauigkeit beträgt 1/100 mm.

Vermessung des Prototyp und der gezahnten Stahlprismen:

Die Zähne der Prüfkörper werden auf der Vorder- und Rückseite von Null beginnend paarweise durchnummeriert. Um eine rechtwinklige Ausrichtung zu erlangen, werden die Stahlteile auf einer ebenen Unterlage mit Schraubzwingen gesichert. Die Zähne werden dabei möglichst spielfrei, ähnlich des späteren Einbaus in der Prüfmaschine, in die Lage gebracht. Es werden die Parameter a , l_z , h_z , α_z , r_1 , r_2 und r_3 vermessen und mit den Werten aus der CAD-Zeichnung verglichen (Abb. 3.43 u. Anhang F). Diese Vermessung zeigt ebenfalls auf der Wassereintrittsseite eine genauere Fertigung und somit eine geringere Abweichung als auf der Wasseraustrittsseite. Die Fertigungsgenauigkeiten der Prüfkörper sind jedoch genauer als die allgemeinen Angaben aus Tabelle 2.3. Die Abweichungen bei den Längen l_z und a_z betragen im Mittel etwa 0,003mm je 1mm Blechdicke. Die Abweichungen der SollmaÙe bei den Radien sind generell größer. Je kleiner der Radius ist, desto ungenauer kann dieser gefertigt werden. Die Abweichungen liegen hier beispielsweise beim Radius 1 des Prüfkörpers I/P1 bei etwa 30% gegenüber der CAD-Zeichnung.

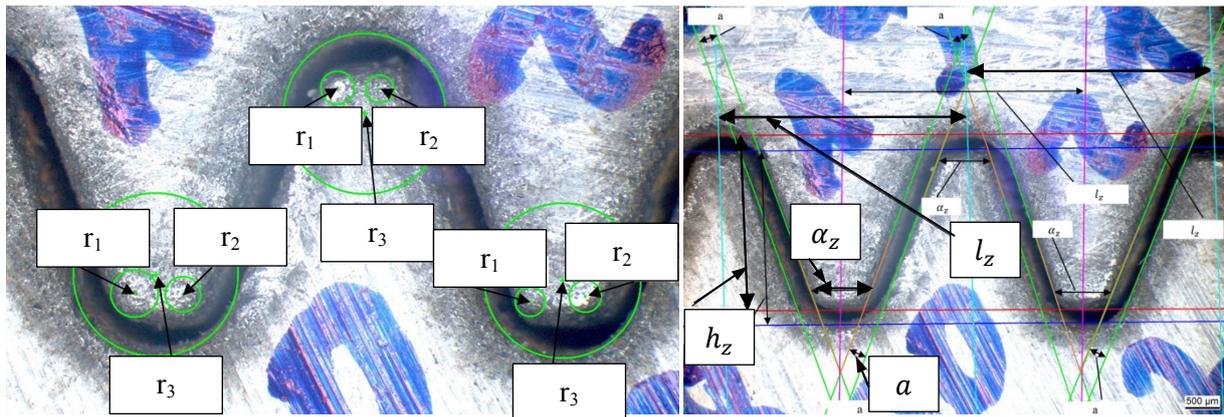


Abb. 3.43: Vermessene Parameter der Stahlverzahnung

3.8.2 Prüfmaschine und Messtechnik

Prüfmaschine:

Es wird eine Druckprüfmaschine der Bauform 2031 der Fa. Toni Technik GmbH mit einer maximalen Prüflast von 3,0 MN eingesetzt. Die Lastaufbringung erfolgt weggesteuert in Stufen mittels Rampengenerator.

Computergesteuertes Messsystem:

Um die Daten der Versuche möglichst umfangreich aufnehmen zu können, wird ein Computergesteuertes Messsystem verwendet, das Messwerte im 0,4 Sekunden Takt aufzeichnet. Während des Versuchs werden ausgewählte Arbeitslinien auf dem Bildschirm dargestellt. Dadurch wird eine Plausibilitätskontrolle ermöglicht. Das Messsystem empfängt Daten aus der Prüfmaschine (Kraftmessdose), jene der induktiven Wegaufnehmer (IWA) sowie der Dehnmessstreifen (DMS).

Induktive Wegaufnehmer (IWA):

Durch die Belastung resultierende Wege werden durch induktive Wegaufnehmer (IWA) aufgezeichnet (Abb. 3.44). Diese werden mit Magnetstativen neben dem Versuchskörper platziert. Die vertikalen Wege werden mittig am Prüfkörper an der oberen Lasteinleitungsplatte vor und hinter dem Prüfkörper aufgezeichnet. Um die Verschiebung der Zähne gegeneinander zu erfassen, werden horizontale Wegaufnehmer im oberen Bereich der spitz zulaufenden Prüfkörperhälften platziert.

Dehnmessstreifen (DMS):

Um Informationen zu den Dehnungen im Bauteil und den daraus resultierenden Spannungen zu erhalten, werden elektrische Widerstands-Dehnmessstreifen verwendet. Diese werden auf das Bauteil aufgeklebt. Die DMS messen Widerstandsänderungen (Dehnungs-Widerstand-Effekt elektrischer Leiter), die durch eine Belastung des Bauteils hervorgerufen werden.

Es werden folgende DMS verwendet:

Lage „A“: 1-LY11-10/120 der Firma Tokyo Sokki Kenkyujo Co., Ltd.; k-Faktor $2,11 \pm 1\%$

Lage „B“: 1-LY11-2/120 der Firma Tokyo Sokki Kenkyujo Co., Ltd.; k-Faktor $2,2 \pm 1\%$

Lage „B“: 1-LY11-0,3/120 der Firma Hottinger Baldwin Messtechnik GmbH; k-Faktor $2,11 \pm 1\%$

Die DMS besitzen einen Nennwiderstand von 120 Ω .

Die DMS 1-LY11-0,3/120 werden am Prüfkörper im Bereich der Zahnausrundungen verwendet. Um die Spannungen am Zahngrund einschätzen zu können, werden acht DMS 1-LY11-0,3/120 unterhalb der Zahnausrundung angeordnet (Abb. 3.46). Der Fokus liegt bei den Prüfkörpern P1 bis P4 auf den äußeren Zähnen. Bei den Prüfkörpern P5 bis P14 werden auch die innen liegenden Zähne betrachtet. Da die Fläche am Zahngrund sehr klein ist, werden die DMS je Zahnausrundung einmal auf die Vorderseite und einmal auf die Rückseite geklebt. Es wird die Dehnung ($\mu\text{m}/\text{m}$) gemessen. Diese Werte in Abhängigkeit zur Belastung sind dokumentiert (Anhang C). Auf diese Weise ist es möglich, die elastischen Spannungen zu berechnen und daraus mit Hilfe der Neuberhyperbel (Kap. 3.3) die Spannungen des plastizierten Werkstoffs abzuleiten. Die DMS 1-LY11-10/120 werden zu je zwei Stück auf der Vorder- und Rückseite im Abstand von 30 mm (Achismaß DMS) von Unterkante des Prüfkörpers aus angebracht. Diese dienen dazu, zu überprüfen, wie gleichmäßig der Prüfkörper belastet wird. Beim

Referenzkörper werden zusätzlich zwei DMS 1-LY11-10/120 an Vorder- und Rückseite im Abstand von 30mm (Achismaß DMS) von Oberkante des Prüfkörpers aus angebracht.

3.8.3 Versuchsaufbau

Die beschriebenen gezahnten Stahlprismen werden mittig in der Prüfmaschine platziert (Abb. 3.44). Oben und unten wird eine Stahlplatte mit den Abmessungen $l/b/t=100/100/20\text{mm}$ aus S355 zur Lasteinleitung verwendet.

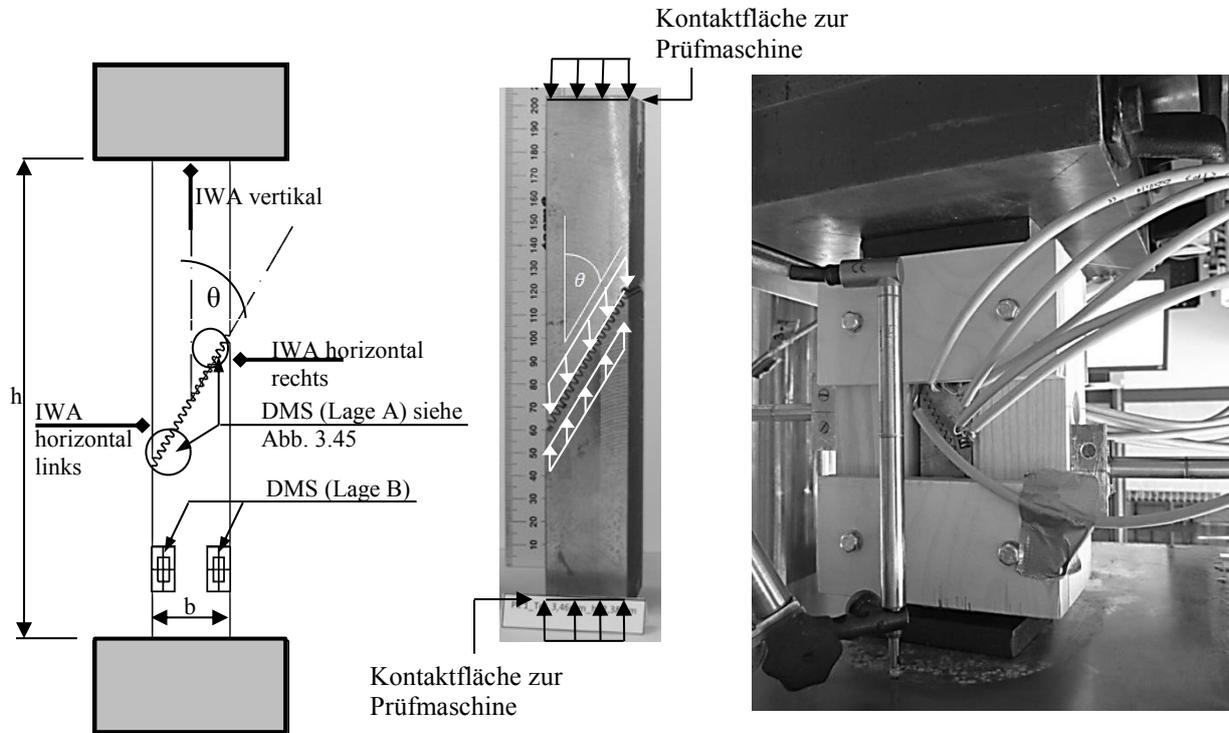


Abb. 3.44: Versuchsaufbau

Aus Sicherheitsgründen wird um das Stahlprisma ein Gehäuse aus Holz platziert, welches 2 cm tiefer als der Prüfkörper ist (Abb. 3.44 rechts). Das Gehäuse lässt eine axiale Verschiebung der Zähne zu. Im Bereich der Zähne ist das Gehäuse ausgespart, sodass hier die Kabel der DMS herausgeführt werden können und die Zähne während des Versuchs sichtbar sind. Nach dem Erfahrungen zur Versuchsdurchführung vorhanden sind, werden auch einige Versuche ohne das Holzgehäuse durchgeführt.

Anordnung der Dehnmessstreifen (vgl. Abb. 3.55 und Anhang C):

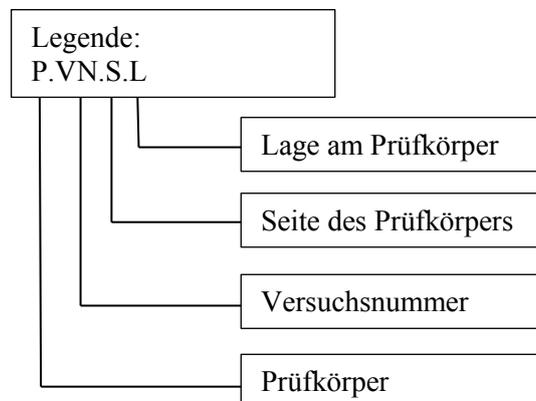


Abb. 3.45: Legende zur Anordnung der DMS

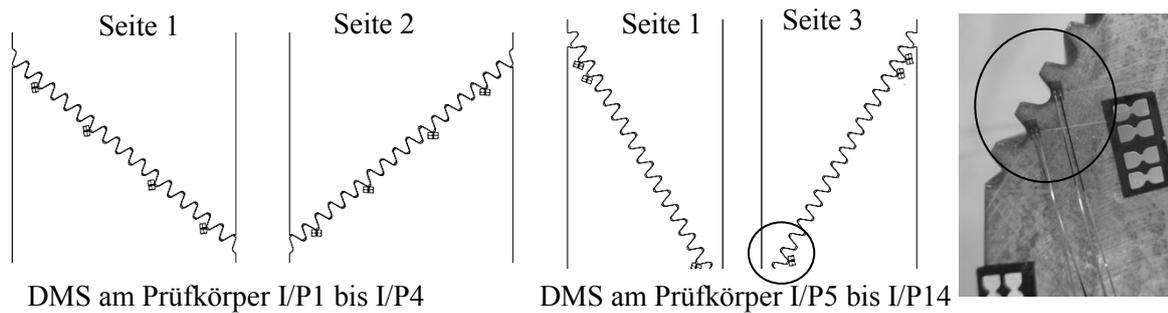


Abb. 3.46: Anordnung der DMS

3.8.4 Versuchsdurchführung

Die Prüfkörper werden in 15 Laststufen mit einer Prüfgeschwindigkeit von 0,6 mm/sec. belastet. Zunächst wird die Belastung auf 20 kN gefahren. Es wird die Lage des Prüfkörpers und der Lasteinleitungsplatten kontrolliert, da ab dieser Last die Kalotte der Prüfmaschine fixiert ist. Es folgt eine Belastung auf 10% und danach drei Belastungszyklen bis etwa 30% der erwarteten Versuchslast F_u . Danach werden nochmal drei Belastungszyklen bis auf etwa 50% der erwarteten Versuchslast F_u gefahren. Die letzte Rampe wird bis zum Versagen des Prüfkörpers belastet. Die Laststufen werden in Anlehnung an DIN EN 12390-13 definiert (Tab. 3.10).

Tab. 3.10: Laststufen in kN

Rampe		1	2	3, 4, 5	6, 7, 8	9		1	2	3, 4, 5	6, 7, 8	9
Belastung	Allg.	20	$0,1F_u$	$0,3 F_u$	$0,5 F_u$	F_u	I/P7/8	20	37,5	112,5	187,5	F_u
Entlastung		-	20	20	20	-		-	20	20	20	20
Belastung	I/R	20	50	250	300	F_u	I/P9/10	20	62,5	187,5	312,5	F_u
Entlastung		-	20	20	20	-		-	20	20	20	20
Belastung	I/P1/2	20	50	150	250	F_u	I/P11/ 12	20	68	204	340	F_u
Entlastung		-	20	20	20	-		-	20	20	20	20
Belastung	I/P3/4	20	50	150	250	F_u	I/P13	20	102,5	307,5	512,5	F_u
Entlastung		-	20	20	20	-		-	20	20	20	20
Belastung	I/P5/6	20	34	102	170	F_u	I/P14	20	122,5	367,5	612,5	F_u
Entlastung		-	20	20	20	-		-	20	20	20	20

3.8.5 Versuchsbeobachtungen und Messergebnisse

Aufgrund der Druckkräfte verhält sich der Prüfkörper im Kontaktbereich zur Prüfmaschine als eingespannte Lagerung. Der Prüfkörper kann somit als beidseitig eingespannte Stütze betrachtet werden. Wie bei den Untersuchungen von Tandler (2011) ist beim Prüfkörper mit schräger gezahnter Grenzfläche eine s-förmige Verformung des Prüfkörpers zu beobachten (Abb. 3.51). Während des Versuchs zeigt sich bis zu den ersten drei Belastungszyklen ($0,3F_u$) wie die Zähne an der linken Zahnflanke in Kontakt kommen und an der rechten Zahnflanke ein Spalt entsteht. Die Spannungen in den Zähnen befinden sich im elastischen Bereich. Bei den zweiten drei Belastungszyklen ($0,5F_u$) treten teilweise erste plastische Verformungen in den Zähnen auf. Da die Zähne durch das Wasserstrahlschneiden auf der Seite des Wasserstrahlaustritts ungenauer gefertigt sind, zeigen sich die plastischen Verformungen hier zuerst. Durch die weitere Lasterhöhung verformen sich die Zähne immer stärker. Die Zahngeometrie wird vor und nach dem Versuch fotografiert (Abb. 3.47).

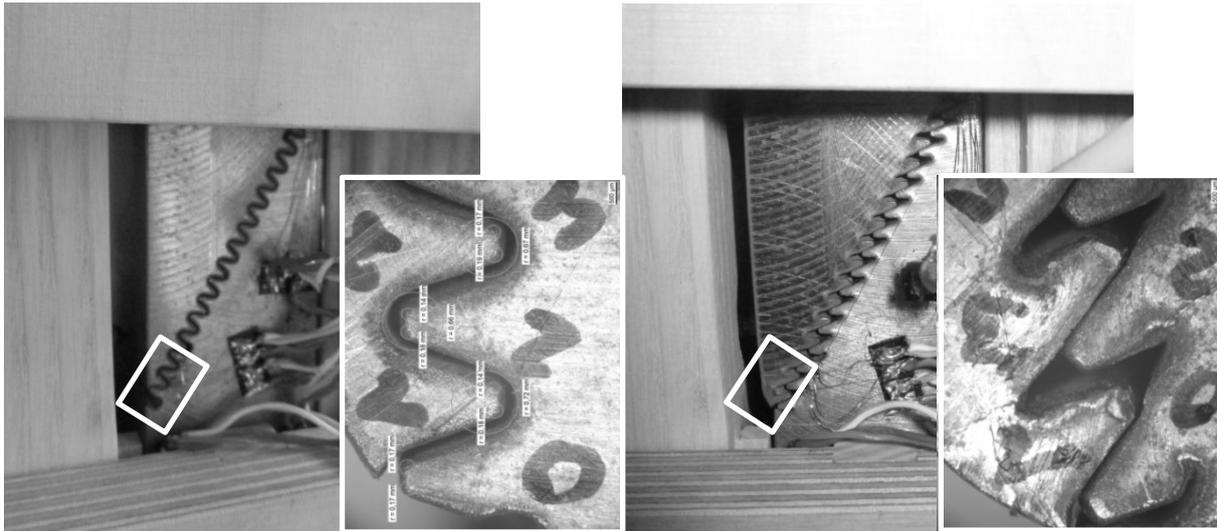


Abb. 3.47: Links: Prüfkörper P1 in der Prüfmaschine und Mikroskopaufnahme vor dem Versuch (links) und nach dem Versuch (rechts)

Einfluss der Zahngeometrie

Die Hysterese der Belastungszyklen zeigt bei der Zahngeometrie GT5 beim Prüfkörper I/P1 und I/P2 einen größeren Anfangsschlupf sowie eine größere Verformung bis zum Erreichen der Streckgrenze (Abb. 3.48). Hier zeigen sich die direkten Auswirkungen aus der Fertigung, da die Fertigungsgenauigkeit mit den kleiner werdenden Zähnen abnimmt. Die Verformung, bei der die Streckgrenze erreicht ist, liegt bei GT7 (I/P3 u. 4) etwa 0,1 mm vom Referenzkörper – ohne Verzahnung – entfernt, bei GT5 sind es etwa 0,25 mm.

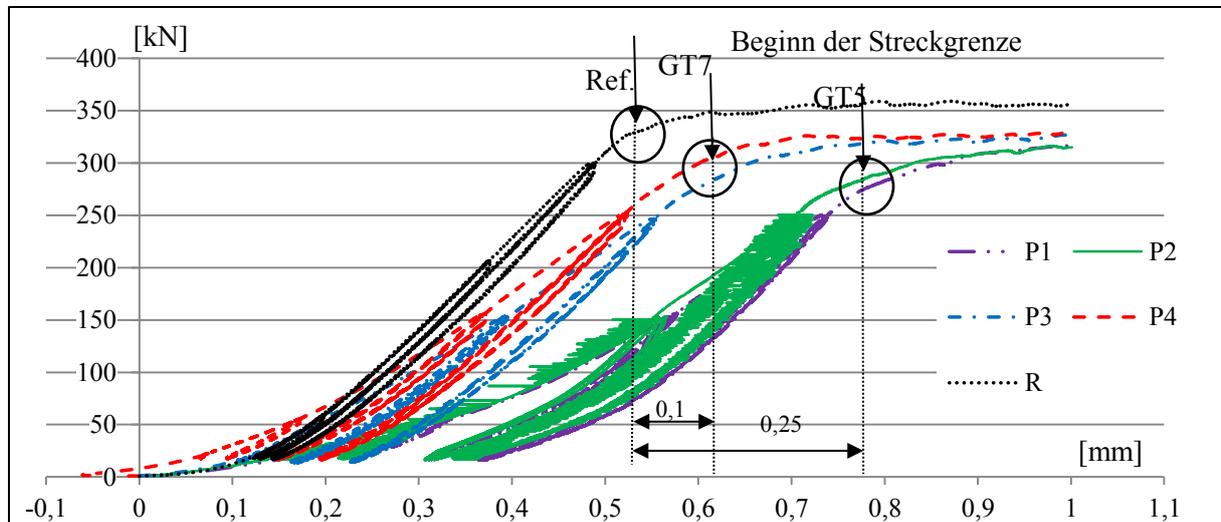


Abb. 3.48: Last-/Verformungskurve Verformung bis Streckgrenze Phase I: P1, P2, P3, P4, R, Fugeneigung 30°

Beim Prüfkörper mit 30° geneigten Lastangriff hat Zahngeometrie GT7 (I/P3/4) gegenüber GT5 (I/P1/2) eine um 16% höhere Traglast (Tab. 3.12). Zahngeometrie GT5 wird bis zum Versagen belastet. Die Zähne verformen sich sehr stark und gleiten bei einer Vertikalverformung von etwa 8mm übereinander hinweg (Abb. 3.49, P2). Bei GT7 hingegen verkeilen sich die Zähne (Abb. 3.49, P4). Das führt zu einem zusätzlichen Widerstand, welcher sich in einem ausgeprägten Verfestigungsbereich ausdrückt (Abb. 3.49). Das Verkeilen der Zähne wird durch die s-förmige Verformung des Prüfkörpers begünstigt, da die im weiteren Versuchsverlauf zusätzlich aufgebrachte vertikale Verformung nicht zu einer axialen Verformung der Zähne führt, sondern zur Biegeverformung des Prüfkörpers.

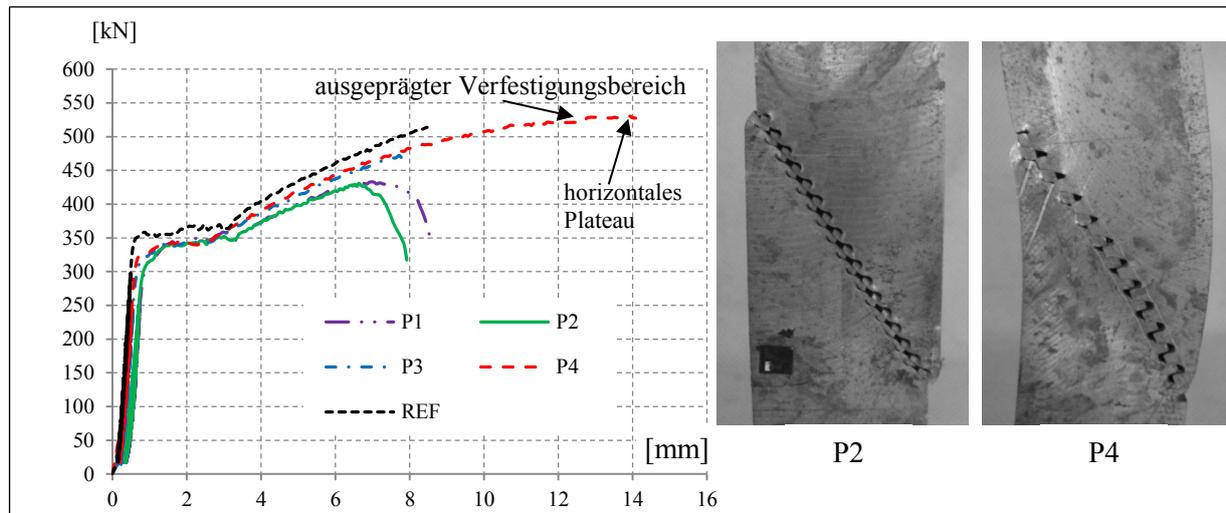


Abb. 3.49: Last-/Verformungskurve Phase I: P1, P2, P3, P4, R

Sowohl der Referenzprüfkörper als auch die Prüfkörper der Geometrie GT7 (P3 u. P4) werden nicht bis zum Bruch belastet. Der Referenzkörper wird um 9,28mm zusammengedrückt und die Verzahnung von P3 und P4 zeigt deutliche Verformungen. Die gezahnten Prüfkörper verformen sich s-förmig. Aus Sicherheitsgründen werden die Versuche bei den großen Verformungen abgebrochen. Um zu prüfen, wann bei der Zahngeometrie GT7 die maximale Prüflast erreicht ist, wird der Prüfkörper P4 trotz der bereits großen Verformungen erneut belastet. Die Last-Verformungskurve schließt am Endpunkt des abgebrochenen Versuchs an und verläuft weiter bis zur Maximallast bei 532kN (Tab. 3.12). Der Versuch wird beim Erreichen des horizontalen Plateaus erneut abgebrochen (Abb. 3.49).

Einfluss der Lastangriffswinkel

Mit der Geometrie GT5 werden die Kraftangriffswinkel $\theta = 20^\circ, 25^\circ, 30^\circ, 45^\circ, 50^\circ, 70^\circ$ und 90° getestet. Die Prüfkörper mit den $20^\circ, 25^\circ$ und 30° geneigten gezahnten Fugen versagen auf Gleiten. Bei den Prüfkörpern $50^\circ, 70^\circ$ und 90° wird ein Versagen auf Druck festgestellt. Dabei werden die Zähne soweit verformt, bis die beiden Stahlquerschnitte aufeinander stehen. Die Stahlquerschnitte können weiterhin Kräfte übertragen, weshalb dieser Zustand kein Versagen der Verbindung darstellt. Im Folgenden wird das Versagen der Zähne auf Druck als Druckbruch bezeichnet. Die Prüfkörper verformen sich s-förmig. Da beim Wasserstrahlschneiden eine Seite der Verzahnung genauer als die andere gefertigt ist, zeigt sich zudem eine Biegeverformung in Richtung der genauer gefertigten Seite (konvex). Beim Prüfkörper mit 45° geneigter Fuge zeigt sich sowohl ein Versagen auf Gleiten als auch auf Druck. Dies lässt vermuten, dass die 45° -Neigung einen Grenzfall zwischen Gleiten und Druckbruch darstellt. Bei allen Prüfkörpern mit einer Neigung $\geq 45^\circ$ wird die rechnerische Bruchlast der Prüfkörper-Querschnittsfläche erreicht bzw. überschritten, obwohl die Verzahnung bereits verformt ist (Abb. 3.50 rechts). Hieraus kann geschlussfolgert werden, dass sich eine Verzahnung unter einer Lastneigung von größer 45° wie ein Stahlvollquerschnitt verhält.

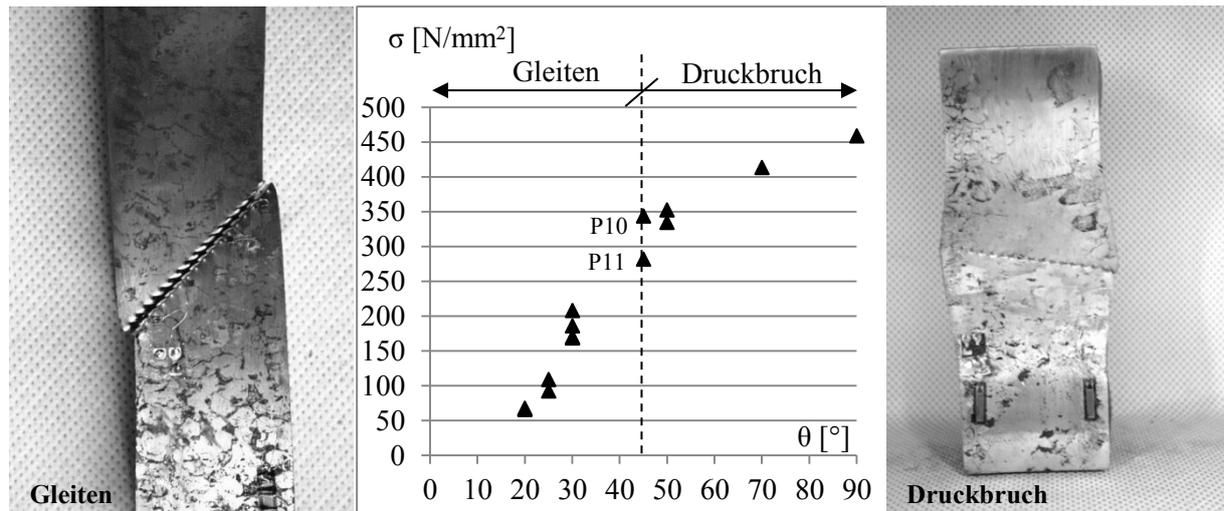


Abb.3.50: Versagensarten „Gleiten“ und „Druckbruch“ mit Angabe der Bruchlasten für unterschiedliche Neigungswinkel

Die Bruchlasten werden auf 1 cm Einzelzahnlänge sowie auf die Fläche der schrägen Fuge bezogen (Tab. 3.11). Hier zeigt sich deutlich die Abhängigkeit der Traglast vom Kraftneigungswinkel.

Tab. 3.11: Bruchlasten für unterschiedliche Neigungswinkel

	R	P1	P2	P3	P4	P5	P6	P7
θ in °	-	30	30	30	30	20	20	25
q_{sz} in kN/cm Einzelzahn	-	6,4	6,4	9,9	11,1	3,7	3,6	4,1
q_{sz} in N/mm ² Fuge	402	170	169	186	208	68	66	92

	P8	P9	P10	P11	P12	P13	P14
θ in °	25	45	45	50	50	70	90
q_{sz} in kN/cm Einzelzahn	4,9	10,0	12,2	12,4	11,8	14,5	16,3
q_{sz} in N/mm ² Fuge	109	282	344	352	335	414	459

Tab. 3.12: Versuchsergebnisse Phase I im Überblick

	Bezeichnung	Anzahl Zähne [n]	Breite Zähne [cm]	Kraftwinkel [°]	Versuchslastkomponente F _⊥ (Exp.) [kN]	Versuchslastkomponente F _∥ (Exp.) [kN]	Versuchslast Fres (Exp.) [kN]	Versuchslast in kN pro cm Einzelzahnlänge (Exp.) [kN/cm]	Versuchsspannung im Querschnitt [N/mm ²]	Breite [mm]	Tiefe [mm]	Fläche [mm ²]	Zugfestigk. [N/mm ²]	Rechnerische Bruchlast [kN]	Versagen	
															rechn. Bruchlast > Versuchslast	Druckversagen
I/R	Stahlreferenzprisma R			90	515	0	515		402	32	40	1280	440	563	rechn. Bruchlast > Versuchslast	Druckversagen
I/P1	Stahl/Stahlprisma Verz. sehr klein 30°	17	4,0	30	217	377	435	6,4	340	32	40	1280	440	563	rechn. Bruchlast > Versuchslast	Gleiten
I/P2	Stahl/Stahlprisma Verz. sehr klein 30°	17	4,0	30	216	374	432	6,4	338	32	40	1280	440	563	rechn. Bruchlast > Versuchslast	Gleiten
I/P3	Stahl/Stahlprisma Verz. klein 30°	12	4,0	30	238	413	476	9,9	372	32	40	1280	440	563	rechn. Bruchlast > Versuchslast	Gleiten
I/P4	Stahl/Stahlprisma Verz. klein 30°	12	4,0	30	266	461	533	11,1	416	32	40	1280	440	563	rechn. Bruchlast > Versuchslast	Gleiten
I/P5	Stahl/Stahlprisma Verz. sehr klein 20°	17	4,0	20	87	238	253	3,7	198	32	40	1280	387	495	rechn. Bruchlast > Versuchslast	Gleiten
I/P6	Stahl/Stahlprisma Verz. sehr klein 20°	17	4,0	20	84	231	246	3,6	192	32	40	1280	387	495	rechn. Bruchlast > Versuchslast	Gleiten
I/P7	Stahl/Stahlprisma Verz. sehr klein 25°	17	4,0	25	118	254	280	4,1	219	32	40	1280	387	495	rechn. Bruchlast > Versuchslast	Gleiten
I/P8	Stahl/Stahlprisma Verz. sehr klein 25°	17	4,0	25	139	299	330	4,9	258	32	40	1280	387	495	rechn. Bruchlast > Versuchslast	Gleiten
I/P9	Stahl/Stahlprisma Verz. sehr klein 45°	17	4,0	45	481	481	680	10,0	399	42,6	40	1704	387	659	Versuchslast > rechn. Bruchlast	Gleiten
I/P10	Stahl/Stahlprisma Verz. sehr klein 45°	17	4,0	45	586	586	829	12,2	487	42,6	40	1704	387	659	Versuchslast > rechn. Bruchlast	Druckversagen
I/P11	Stahl/Stahlprisma Verz. sehr klein 50°	17	4,0	50	646	542	843	12,4	460	45,8	40	1832	387	709	Versuchslast > rechn. Bruchlast	Druckversagen
I/P12	Stahl/Stahlprisma Verz. sehr klein 50°	17	4,0	50	614	515	801	11,8	437	45,8	40	1832	387	709	Versuchslast > rechn. Bruchlast	Druckversagen
I/P13	Stahl/Stahlprisma Verz. sehr klein 70°	17	4,0	70	925	337	984	14,5	440	55,9	40	2236	387	865	Versuchslast > rechn. Bruchlast	Druckversagen
I/P14	Stahl/Stahlprisma Verz. sehr klein 90°	17	4,0	90	1111	0	1111	16,3	459	60,5	40	2420	387	937	Versuchslast > rechn. Bruchlast	Druckversagen

3.9 Numerische Simulation an Stahlprismen mit gezahnter Kontaktfläche

3.9.1 Simulationsmodell und Belastung

Die Versuche an den Stahlprismen werden sowohl zwei- als auch dreidimensional mit der Finite Element-Methode geometrisch nichtlinear sowie physikalisch nichtlinear simuliert. Es werden dabei die Werkstoffmodelle aus Kapitel 3.5 sowie die Simulationsgrundlagen aus Kapitel 3.6 angewandt. Davon abweichende oder zusätzliche Parameter werden beschrieben. Da sich aufgrund der Druckkräfte im Versuch sowohl oben als auch unten an den Prüfkörperenden eine Einspannung einstellt, wird auch in der Simulation eine Rotation behindert. Am unteren Auflager wird die Horizontallast H , die Vertikallast V und das Momente M aufgenommen (Abb. 3.51). Am oberen Auflager werden die Horizontallast und das Moment aufgenommen, Vertikallasten werden übertragen. Die Vertikallast wird als konstante Flächenlast auf die stirnseitige Fläche des Prüfkörpers aufgegeben. Weiter werden die Versuche mit Kraftneigung $\theta = 20^\circ, 25^\circ, 50^\circ$ und 90° simuliert (Abb. 3.53).

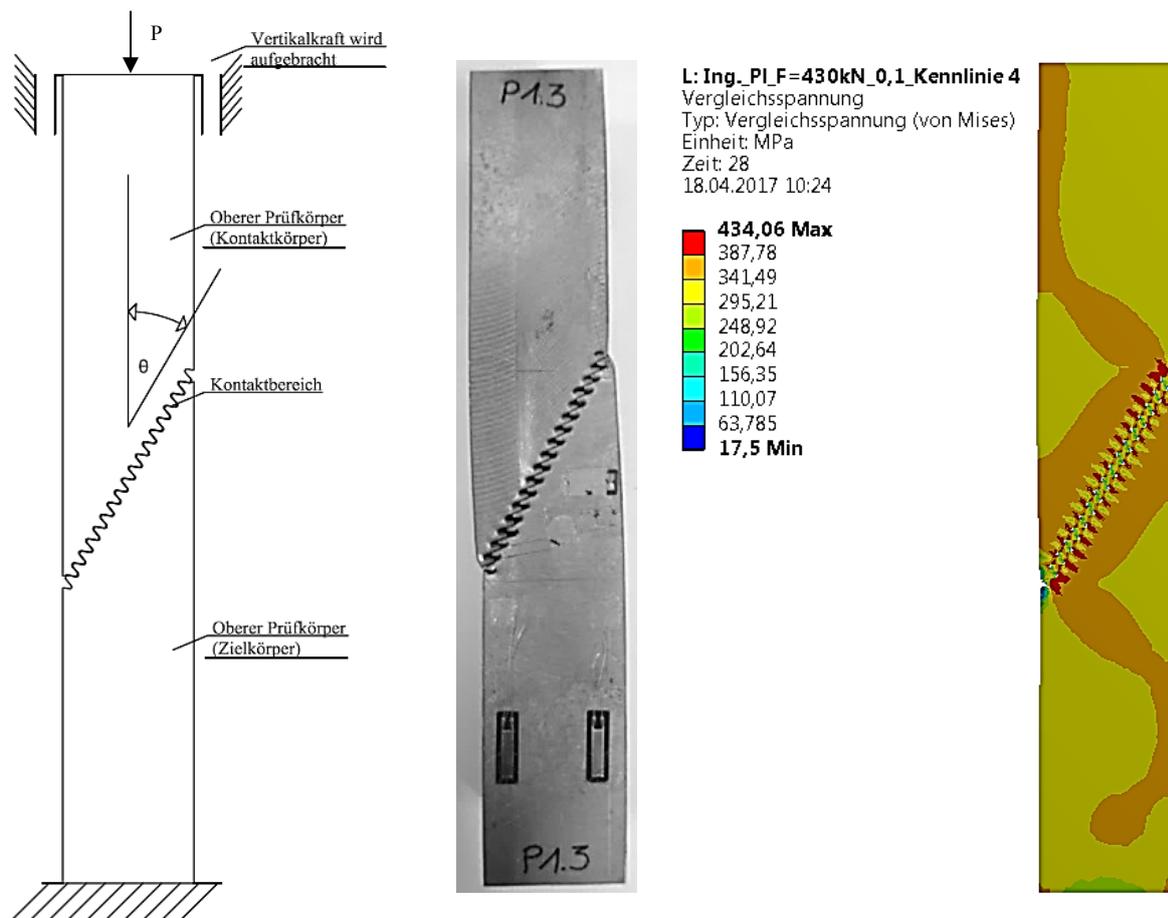


Abb. 3.51: Simulationsmodell/Statisches System mit Prüfkörper und Simulationsergebnis

Lastaufbringung:

Die Lastaufbringung erfolgt in Lastschritten über eine konstante Flächenlast, die auf die Oberseite des oberen Prüfkörpers aufgegeben wird.

Kontakte:

Die Berührflächen der einzelnen Elemente zueinander werden als Kontakte definiert. Die feine Stahlverzahnung wird mit einem Reibbeiwert von $\mu=0,0, 0,1, 0,15$ und $0,2$ simuliert.

3.9.2 Simulationsergebnisse

Einfluss der Ingenieurskennlinie und der wahren Kennlinie

Das Stahlprisma mit unter $\theta = 30^\circ$ geneigter Verzahnung wird sowohl mit der Materialkennlinie der Ingenieurspannung als auch mit der Materialkennlinie der wahren Spannung gerechnet. Die Versuchs-

nachrechnung mit der Ingenieurkennlinie bildet den Lüdersbereich gut ab und liegt im Bereich der maximalen Zugfestigkeit etwas unterhalb der Arbeitslinie des Versuchs. Bei Anwendung der Kennlinie der wahren Spannung verläuft die Arbeitslinie der Versuchsnachrechnung im Lüdersbereich oberhalb der Arbeitslinie des Versuchs. Der Bereich der maximalen Zugfestigkeit stimmt gut überein (Abb. 3.52). Das Verhalten ist auch bei den Prüfkörpern mit Neigungen $\theta = 20^\circ, 25^\circ, 45^\circ, 50^\circ, 70^\circ$ und 90° sowie dem Referenzprisma zu erkennen. Die Versuchsnachrechnungen werden mit der Kennlinie der wahren Spannungen sowie stichpunktartig mit der Ingenieurkennlinie durchgeführt. Dadurch können die Arbeitslinien der Versuche und die der Nachrechnungen gut interpretiert werden.

Einfluss der Fertigungsgenauigkeit/Modellierung eines Spalt

Ferner wird ein Prüfkörper mit einem Spalt von 0,09mm modelliert. Dieser bildet somit auch die Fertigungsgenauigkeiten des Wasserstrahlschneidens ab. Diese Fertigungsgenauigkeiten führen dazu, dass auf einer Seite die Zahnflanken in Kontakt sind (Zahnflanke links) und auf der gegenüberliegenden Seite ein Spalt entsteht (Zahnflanke rechts). Der Prüfkörper mit Spalt wird auch mit der Ingenieurkennlinie simuliert und zeigt keine nennenswerten Abweichungen gegenüber der Rechnung mit beidseitigem Kontakt (Abb. 3.52). Dass die Arbeitslinie der Berechnung mit Spalt geringfügig unterhalb derer ohne Spalt liegt, ist auf den geringeren Stahlquerschnitt des Zahns zurückzuführen. Somit entsteht kein nennenswerter Fehler aus beidseitigem Kontakt, wenn die Versuche ohne Spalt nachgerechnet werden.

Einfluss des Reibbeiwertes auf die Last/Verformungskurve

Die Berechnung mit Reibbeiwert $\mu=0$ und $\mu=0,2$ zeigt, dass der reibungsbehaftete Ansatz bei gleicher Verformung größere Kräfte aufnehmen kann. Das deckt sich auch mit den Aussagen aus Kapitel 8, dass die Spannungen beim Ansatz von Reibung um etwa 15% abnehmen.

Globales Trag- und Verformungsverhalten

Die Prismen zeigen eine s-förmige Verformung. Die Arbeitslinien zeigen eine gute Übereinstimmung.

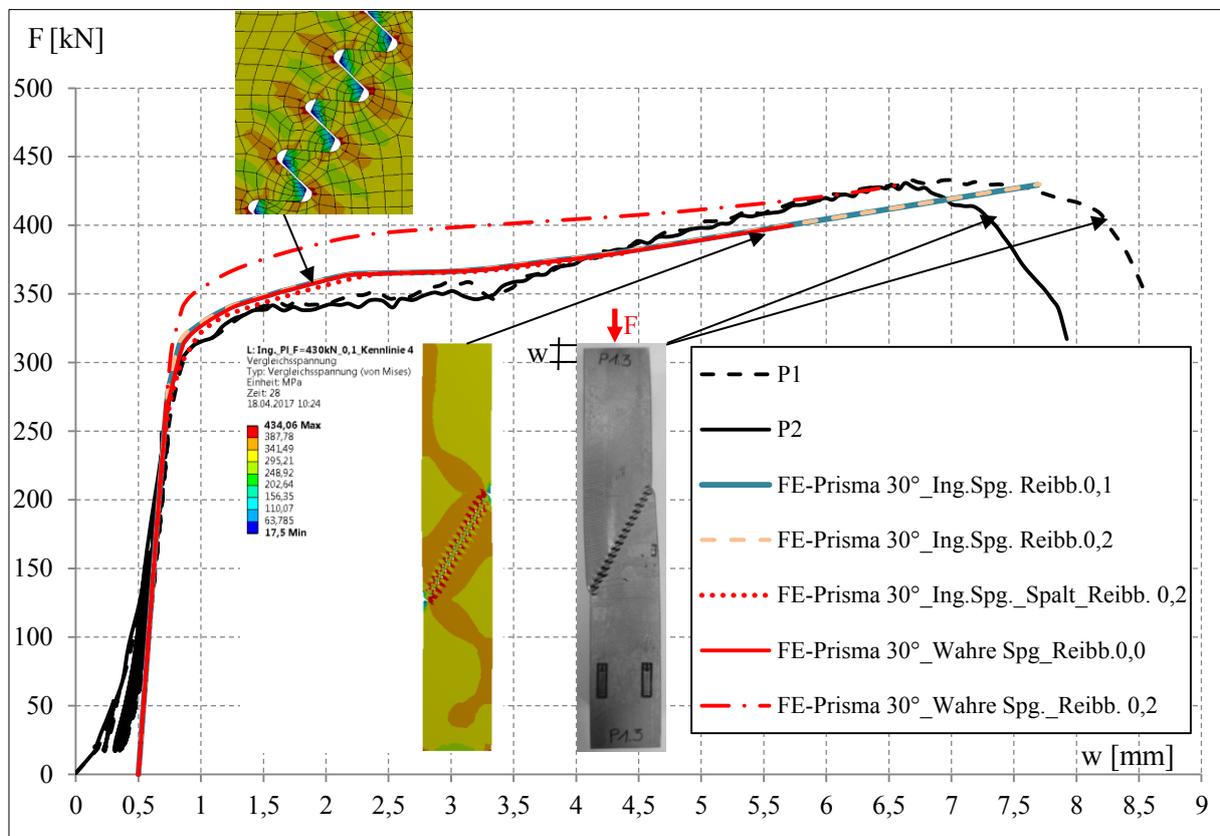


Abb. 3.52: Last-/Verformungskurve IP1 und IP2, experimentell und simuliert (2D)

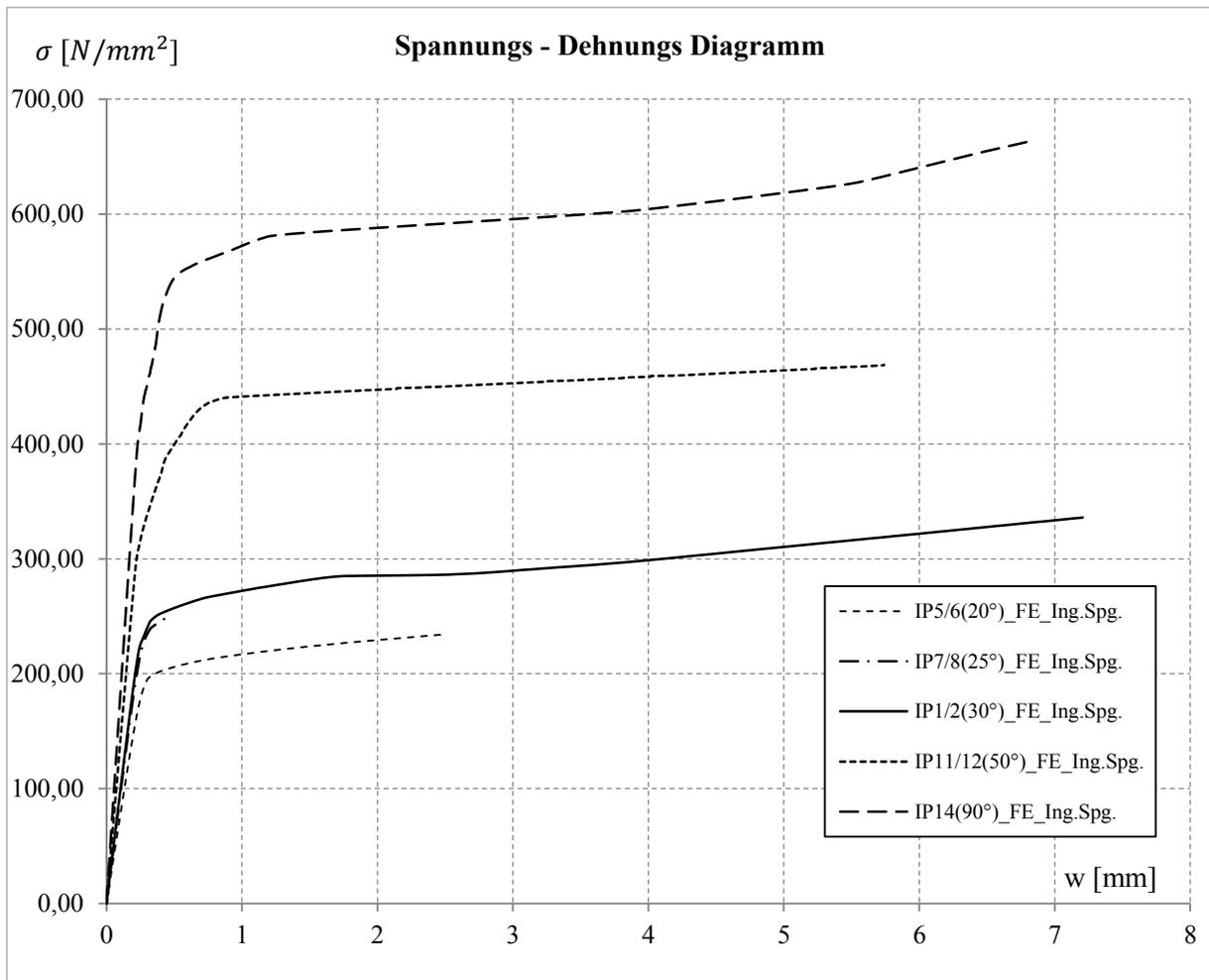


Abb. 3.53: Last-/Verformungskurve IP1,2,5,6,7,8,11,12,14 aus den FE-Simulationen (2D)

Lokales Verformungsverhalten:

Das grundsätzliche Verformungsverhalten kann in der FE-Simulation sehr gut abgebildet werden. Das betrifft insbesondere die Verformungen der einzelnen Zähne (Abb. 3.54).

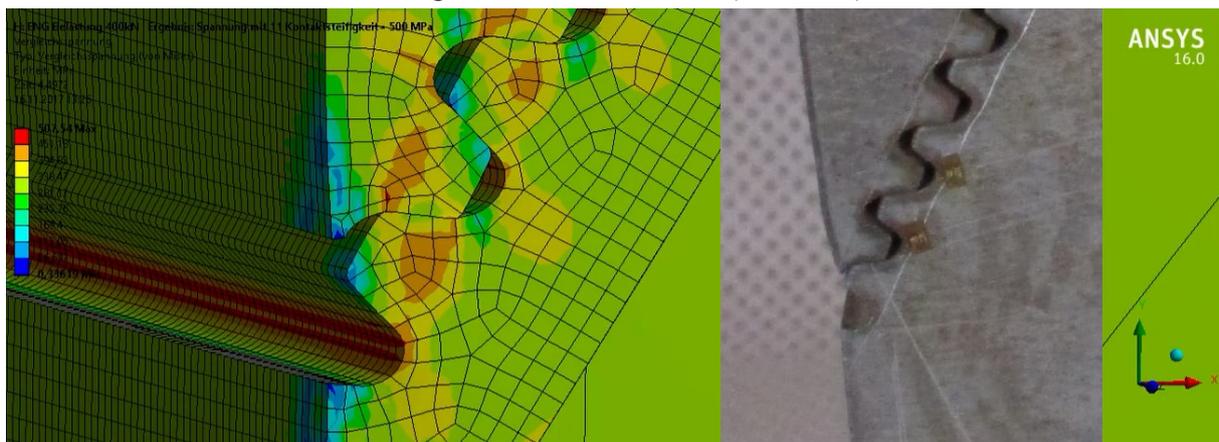


Abb. 3.54: Visuelle Darstellung lokaler Verformungen

Die Prüfkörper werden mit DMS versehen um an lokalen Stellen die Dehnungen zu messen und somit Rückschlüsse auf die Spannungsverteilung im Prüfkörper zu ermöglichen (Abb. 3.55). An den Prüfkörpern werden in Lage B (vgl. Abb. 3.44) auf der Vorder- und Rückseite je zwei DMS angebracht, um anhand der Spannungsverteilung zu sehen, ob die Kraft konstant auf den Prüfkörper wirkt. Bereits während des Versuchs kann die Arbeitslinie der DMS überprüft werden. Sowohl im Prüfkörper I/P1 als auch im Prüfkörper I/P2 zeigen die DMS-Messungen ausreichend konstante Dehnungen (Abb.

3.55). Die Belastung auf den Prüfkörper wird konstant eingeleitet. Die vertikalen Dehnungen im FE-Modell an der Lage B „DMS_ru“ und „DMS_lu“ verlaufen ähnlich zu jenen der Versuche. Der elastische Bereich wird exakt abgebildet. Der Lüdersbereich verläuft im FE-Modell geringfügig oberhalb, der Verfestigungsbereich unterhalb der Arbeitslinie des Versuchs. Im Hinblick auf Aussagen für die Bemessung und die Sicherheiten kann der Versuch mit dem Modell ausreichend genau abgebildet werden.

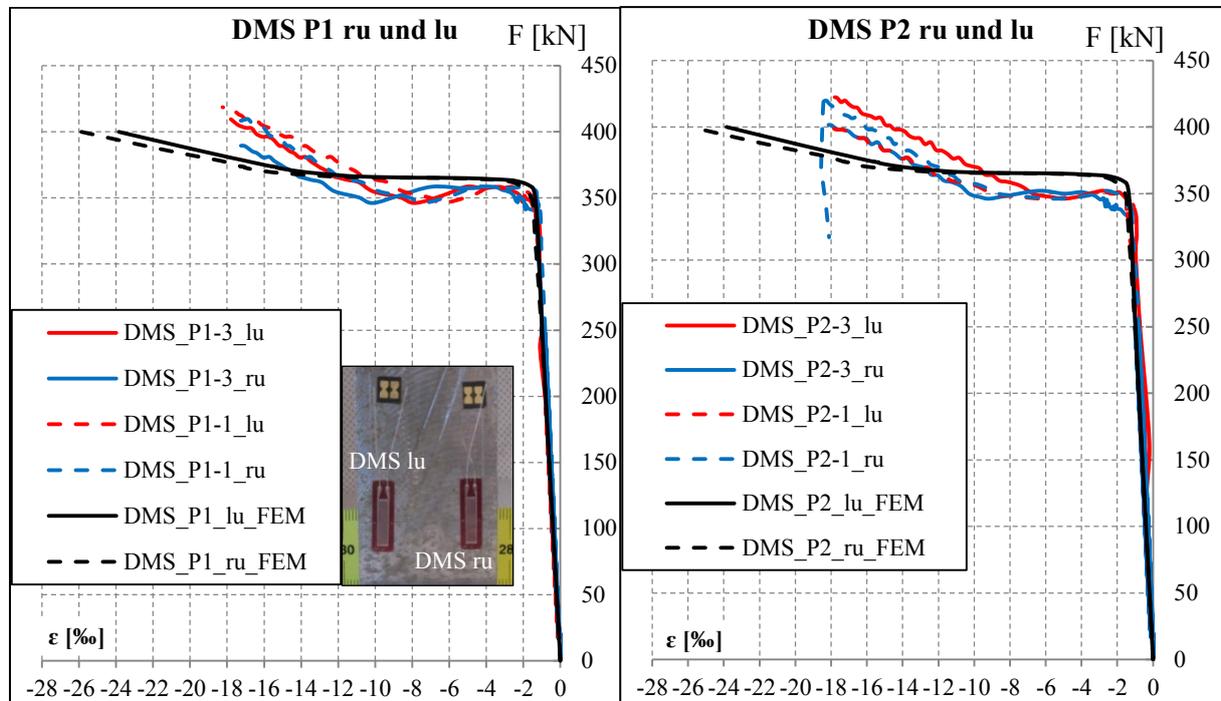


Abb. 3.55: Vergleich DMS lu und ru mit FE-Rechnung

3.10 Zusammenfassung zur Stahlzahngeometrie

Kapitel 3 zeigt die Entwicklung einer Zahngeometrie, die in der modularen Hochleistungsverbindung zur Kraftübertragung verwendet wird. Dabei werden in einer Literaturstudie Maschinenelemente hinsichtlich einer Adaption auf das Bauwesen untersucht. Aufgrund der ebenen Flanken sowie der Neigungswinkel ist die Geometrie von Gewinden am besten geeignet, vor allem das Trapezzgewinde und das Whitworthgewinde.

In gezahnten Bauteilen sind Singularitätsstellen von besonderer Bedeutung. In Kontaktbereichen kann es zur Ausbildung des Phänomens ähnlich der Hertz'schen Pressungen kommen. Die Zahngrundausrundung zwischen zwei Zähnen ist eine Kerbe, die ebenfalls zu Spannungsspitzen führt. Diese erhöhten Spannungen müssen gesondert bewertet und das Bauteil dahingehend optimiert werden.

Auf dieser Grundlage erfolgen grundlegende Überlegungen zur konkreten Zahngeometrie. Anhand einer allgemeinen Zahngeometrie wird der Kraftangriff auf der Zahnflanke aufgezeigt und ein stabilisierendes Winkelspektrum, sowie ein destabilisierendes Winkelspektrum definiert (Abb. 3.9). Es werden fünf Zahngeometrien entworfen (Tab. 3.2) und die Vor- und Nachteile aufgezeigt. Grundsätzlich können die Zähne als Dreieck, Rechteck oder Trapez ausgeführt werden, wobei das Rechteck nur einen theoretischen Grenzfall darstellt.

In einem weiteren Schritt werden 13 Zahngeometrien entworfen und in Parameterstudien mit einem zweidimensionalen FE-Modell in Ansys untersucht. Dabei wird ein Zahnleistenpaar horizontal aufeinander gelegt. Die Kraftübertragung erfolgt über den Kontakt zwischen den feinen Stahlzähnen. Die Berechnung ist geometrisch nichtlinear und physikalisch nichtlinear. Dabei wird sowohl die wahre Spannung als auch die Ingenieursspannung verwendet. Zur Lagerung des FE-Modells werden zwei Lagersituationen verwendet. In Lagersituation 1 wird die untere Zahnleiste an der Unterseite und an der Stirnseite gleitend gelagert. Bei Lagersituation 2 wird die Unterseite eingespannt. Die obere Zahnleiste wird bei beiden Varianten gegen Verdrehen gehalten. Mithilfe einer Vergleichsspannungsanaly-

se werden an vier Messbereichen (Abb. 3.22) je Zahn die Werte berechnet und daran die einzelnen Parameter miteinander verglichen.

Zunächst wird der Einfluss des Zahngrundradius untersucht. Die Radienänderung ist nicht proportional zur Spannungsabnahme (Abb. 3.25). Je größer der Radius wird, desto weniger große Spannungsänderungen sind zwischen den benachbarten Radien zu beobachten. Um einerseits die Spannungen im Zahngrund möglichst gering zu halten, andererseits den Zahnabstand und somit das Toleranzmaß nicht zu groß zu gestalten, wird bei einer Zahnhöhe von 5 mm ein Zahngrundradius von etwa 1mm gewählt.

Einfluss der Lagersituation: Die Spannungsverteilung bei der Lagersituation 1 unterscheidet sich deutlich von der Lagersituation 2 (Abb. 3.28). Mit der Stahlzahnleiste kann das im Kapitel 3.7.4 beschriebene Verhalten (Spannungsverteilung, Tragverhalten) der Lagersituation 1 analog zum Schraube-Mutter-Kontakt gezeigt werden. Jedoch ist die Lagersituation 1 für die eingebettete Zahnleiste und somit für die Verbindung keine realistische Lagerung. Der Einbau der Zahnleiste entspricht i.d.R. der Lagersituation 2. Deshalb wird diese in den weiteren Betrachtungen verwendet.

Einfluss der Zahngeometrie und Zahnhöhe: Die Geometrie GT5 zeigt entlang der Verzahnung eine gleichmäßige Spannungsverteilung an allen vier Messbereichen. Die Vergleichsspannungen sind zudem verglichen mit jenen der anderen Geometrien relativ gering. Durch den Zahnflankenneigungswinkel von 70° , ist die Geometrie günstig in Bezug auf den stabilisierenden Bereich des Kraftangriffs (vgl. Abb. 3.9). Desweiteren können mit dieser Geometrie Toleranzen sehr genau ausgeglichen werden. Aufgrund der kleinen Abmessungen der Zähne ist das maximale Maß der Abweichung 1,8mm. Aufgrund dieser Vorteile wird diese Geometrie für weitere FE-Untersuchungen verwendet.

Anhand der Geometrie DT5 werden verschiedene geometrische und mechanische Einflüsse auf die Größe und Verteilung der Vergleichsspannungen entlang der Verzahnung untersucht.

Einfluss des Reibbeiwertes: Die Spannungsspitzen, verteilt über die Zahnleisten nehmen mit zunehmendem Reibbeiwert ab. Hinsichtlich der Spannungskonzentrationen stellt der reibungsfreie Kontakt den ungünstigsten Fall da. Durch Aktivierung von Reibung in der Kontaktfuge werden die Spannungen vergleichmäßigt, wodurch sich kleinere Spannungsspitzen ergeben.

Einfluss der Verzahnungslänge: Je länger die Verzahnungslänge, desto gleichmäßiger verteilt sich die Spannung (Abb. 3.33). Dieses Verhalten zeigt sich an jedem Messbereich. Sieht man von der Unregelmäßigkeit der kürzeren Verzahnungen ab, ist die Spannung umgekehrt proportional zur Zahnanzahl.

Einfluss der Lastgröße: Die Spannung an allen vier Messbereichen ist proportional zur einwirkenden Last solange der Stahl im elastischen Bereich ist. Durch das Plastifizieren der Zähne vergleichmäßigen sich die Spannungen.

Einfluss der Lastneigung: Bei sehr flachem Lastangriff (hier $\beta = 20^\circ$) erhöhen sich die Vergleichsspannungen im mittleren Bereich der Verzahnungslänge oberhalb der Verzahnung (Schnitt 1) (Abb. 3.36). Greift die Last unter einem Winkel $\beta = 45^\circ$ an, so sind die Vergleichsspannungen nahezu konstant entlang der Verzahnungslänge. Unter einem Lastangriffswinkel von $\beta = 70^\circ$ sind die Vergleichsspannungen ebenfalls konstant, steigen jedoch am Anfang und am Ende der Zahnreihe an. Die über die Zahnleiste gemittelten Vergleichsspannungen steigen mit kleiner werdenden Winkel β an.

Einfluss des Kontaktsteifigkeitsfaktors: Die Vergleichsspannungen der reibungsbehafteten Berechnungen zeigen bei Kontaktsteifigkeitsfaktor 1 und 2 sehr geringe Abweichungen (Abb. 3.40). Beim reibungsfreien Kontakt gilt das ebenfalls im Bereich der Zahnflanke. Im Bereich der Messbereiche 1 und 3 liegen die Spannungsunterschiede bei unter 15 % und beim Zahngrund unter 5%.

In einer FE-Studie werden Hertz'sche Pressungen mit jenen einer analytischen Berechnung für den Zylinder-Ebene-Kontakt gegenübergestellt. Für zwei Radien ($r=10\text{mm}$ u. $r=20\text{mm}$) wird der Fehler zwischen FE-Rechnung und analytischer Berechnung in Abhängigkeit der Kraft dargestellt (Abb. 3.41). Dieser nimmt mit zunehmender Last ab und beträgt für den untersuchten Bereich unter 4%. Es zeigt sich, dass Hertz'sche Pressungen mit Ansys sehr gut und mit ausreichender Genauigkeit abgebildet werden können. Damit kann das Tragverhalten der Stahlzahnleiste gut eingeschätzt werden. Desweiteren sind diese Studien die Grundlage für das Ingenieurmodell.

Die Untersuchungen am FE-Modell dienen als Grundlage für die experimentellen Versuche zur Zahngeometrie (Phase I). Mit der Geometrie GT5 werden die Kraftangriffswinkel $\theta = 20^\circ, 25^\circ, 30^\circ, 45^\circ, 50^\circ, 70^\circ$ und 90° an gezahnten Stahlprismen getestet. Die Prüfkörper mit den $20^\circ, 25^\circ$ und 30° geneigten gezahnten Fugen versagen auf Gleiten. Bei den Prüfkörpern $50^\circ, 70^\circ$ und 90° wird ein Versagen auf Druck festgestellt. Dabei werden die Zähne soweit verformt, bis die beiden Stahlquerschnitte aufeinander stehen. Die Stahlquerschnitte können weiterhin Kräfte übertragen, weshalb dieser Zustand kein Versagen der Verbindung darstellt. Jedoch wird dieser Zustand als Druckversagen bezeichnet. Beim Prüfkörper mit 45° geneigter Fuge zeigt sich sowohl ein Versagen auf Gleiten als auch auf Druck. Dies lässt vermuten, dass die 45° -Neigung einen Grenzfall zwischen Gleiten und Druckversagen darstellt. Bei allen Prüfkörpern mit einer Neigung $\geq 45^\circ$ wird die rechnerische Versagenslast der Prüfkörper-Querschnittsfläche erreicht bzw. überschritten, obwohl die Verzahnung bereits verformt ist (Abb. 3.50 rechts). Hieraus kann geschlussfolgert werden, dass sich eine Verzahnung unter einer Lastneigung von größer 45° wie ein Stahlvollquerschnitt verhält.

Die Versuche an den Stahlprismen werden sowohl zwei- als auch dreidimensional mit der Finite Element-Methode geometrisch nichtlinear sowie physikalisch nichtlinear simuliert. Das globale Last-Verformungsverhalten sowie die lokalen Effekte können gut abgebildet werden.

4. Duktile Verbindung von Betonbauteilen mit Zahnleisten aus Stahl

4.1 Ziel und Vorgehensweise

Das im Kapitel 2 entworfene Verbindungskonzept sieht zur Verbindung zweier Stahlbetonfertigteile je ein Stahleinbauteil – die Zahnleiste – vor (Abb. 2.29 u. 2.30). In einer Verbindung sitzt diese im Beton und leitet die unter einem Winkel θ angreifenden Kräfte aus dem Beton in das Stahleinbauteil. Dazu werden die betonseitige große Stahlverzahnung genutzt. Ferner wird die Kraft von einem Stahleinbauteil zum anderen und damit in das angrenzende Bauteil übertragen. Die Kraftübertragung zwischen den Stahleinbauteilen erfolgt über die im Kapitel 3 entwickelte feine Stahlverzahnung. In einer zweiten Versuchsphase werden Zahnleistenpaare in Betonprismen unter einem Winkel $\theta = 30^\circ$ und $\theta = 70^\circ$ einbetoniert (Abb. 4.1 rechts). Diese Winkel stellen die untere und obere Grenze der praktischen Anwendung dar. Es werden Versuchskörper mit einem Zahnleistenpaar sowie Versuchskörper mit zwei Zahnleistenpaaren untersucht (vgl. Abb. 4.8 – 4.11).

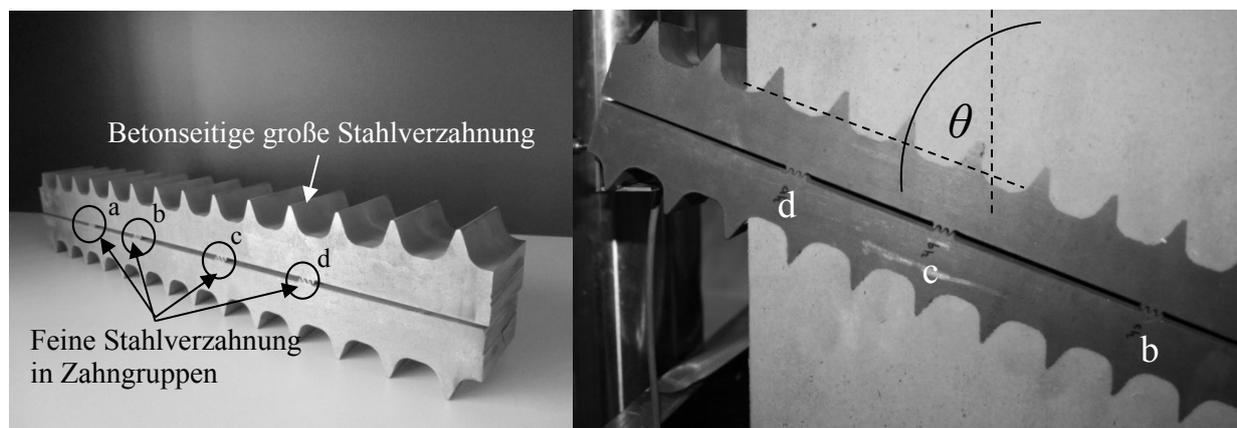


Abb. 4.1 Zahnleistenpaar ohne und mit Beton

In den Versuchen wird ein duktiler Versagen durch Versagen der feinen Stahlzähne angestrebt und kein sprödes Versagen des Betons. Hierzu wird die Zahnanzahl reduziert und in vier Zahngruppen zu je drei Zähnen über die Zahnleiste verteilt. Durch die Verteilung der Zahngruppen wird eine konstante Spannungsverteilung im Prüfkörper angestrebt. Die Zahngruppen werden von unten nach oben mit a, b, c und d bezeichnet (Abb. 4.1). Es wird der Einfluss des umliegenden Betons auf das Trag- und Verformungsverhalten der Zähne untersucht. Dabei werden die Unterschiede zu den Versuchen zur Zahngeometrie (Phase I) betrachtet und geprüft, ob Schädigungen im Beton (Risse, Abplatzungen) eintreten, ob die Zahnleiste Biegeverformungen aufweist, Fugen sich im Bereich der feinen Stahlverzahnung bilden.

nung oder der betonseitigen großen Stahlverzahnung (lösen der Zahnleiste vom Beton) öffnen oder abschnittsweise öffnen.

4.2 Werkstoff und Werkstoffmodell Beton

4.2.1 Materialkennwerte Beton

Verwendeter Beton

Zur Betrachtung, wie sich die Zahnleisten im eingebetteten Beton verhalten, werden in den Kleinversuchen (Phase II) Zahnleisten in Betonprismen, in Phase III Konsolenversuche und in Phase IV Knotenpunktversuche durchgeführt. Dabei wird der Beton Ultralith der Firma Drössler Bauunternehmung, Siegen verwendet. Dabei handelt es sich um einen selbstverdichtenden ultra-hochfesten Beton mit einem Größtkorn von 8 mm. Die Betonage erfolgte am Standort Siegen. Weiterhin werden drei zusätzliche Versuche mit geänderter Konsolengeometrie durchgeführt. Hier erfolgt die Betonage an der TU in Berlin. Es wird der selbstverdichtenden Hochleistungvergussbeton BETEC 180 der Firma GCP Germany GmbH, Essen verwendet. Mit den Bauteilprüfkörpern werden zylindrische Probekörper mit den Abmessungen $d/h=150/300\text{mm}$ nach DIN EN 12390-13 hergestellt und daran die Materialkennwerte bestimmt (Tab. 4.1). Die Spannung-Dehnungslinien der Prüfkörper werden mit der Literatur verglichen (Abb. 4.2). Zusätzlich werden Betonprismen ohne Zahnleisten als Referenzkörper getestet. Die Arbeitslinie des Referenzprüfkörpers (vgl. Abb. 4.5) liegt zur Simulation der Versuche ebenfalls vor.

Werkstoffverhalten des Betons unter einaxialer Druckbeanspruchung

Normalfester Beton zeigt bis ca. 40 % der Druckfestigkeit f_{cm} ein linear-elastisches Verhalten. Danach nehmen die negativen Dehnungen überproportional zu. Nachdem die maximale Druckfestigkeit f_c erreicht ist, entfestigt sich der Beton. Dabei kann dieser die abnehmenden Druckspannungen mit einhergehender Zunahme der negativen Dehnungen aufnehmen bis es zum endgültigen Versagen kommt (Zilch, Zehetmaier 2009). Hochfester- und ultrahochfester Beton hingegen verhält sich bis zum Bruch nahezu durchgängig linear- elastisch. Das Versagen tritt spröde und somit explosionsartig ohne Ankündigung ein (Fehling 2005).

Werkstoffverhalten des Beton unter einaxialer Zugbeanspruchung

Die mittlere Zugfestigkeit f_{ctm} von normalfesten Beton beträgt zwischen 4,8% der Druckfestigkeit beim C100/115 bis 8% der Druckfestigkeit beim C12/15. Untersuchungen von Fehling (2005) zeigen für ultrahochfesten Beton mit einer Druckfestigkeit von etwa 220N/mm^2 eine Zugfestigkeit von etwa $7,0\text{N/mm}^2$, die ca. 3,2% der Druckfestigkeit entspricht. Sowohl für normalfeste als auch für hochfeste Betone verhält sich die Spannungs-Rissöffnungs-Beziehung bis zum Erreichen der maximalen Zugfestigkeit f_{ct} linear-elastisch.

Es werden folgende Kennwerte angesetzt und in der Simulation der Versuche verwendet:

Tab. 4.1: Kennwerte der verwendeten Betone

	Ultralith	BETEC 180		
		Charge ZY4	Charge ZY5	Charge ZY6+7
E-Modul E GPa	44,17	31,34	27,86	28,42
Druckfestigkeit f_{cm} MPa	121,35	80	82,73	87,35
Querdehnzahl ν	0,20	0,20	0,20	0,20

Einordnung der verwendeten Betone und Vergleich mit Kennlinien aus der Literatur:

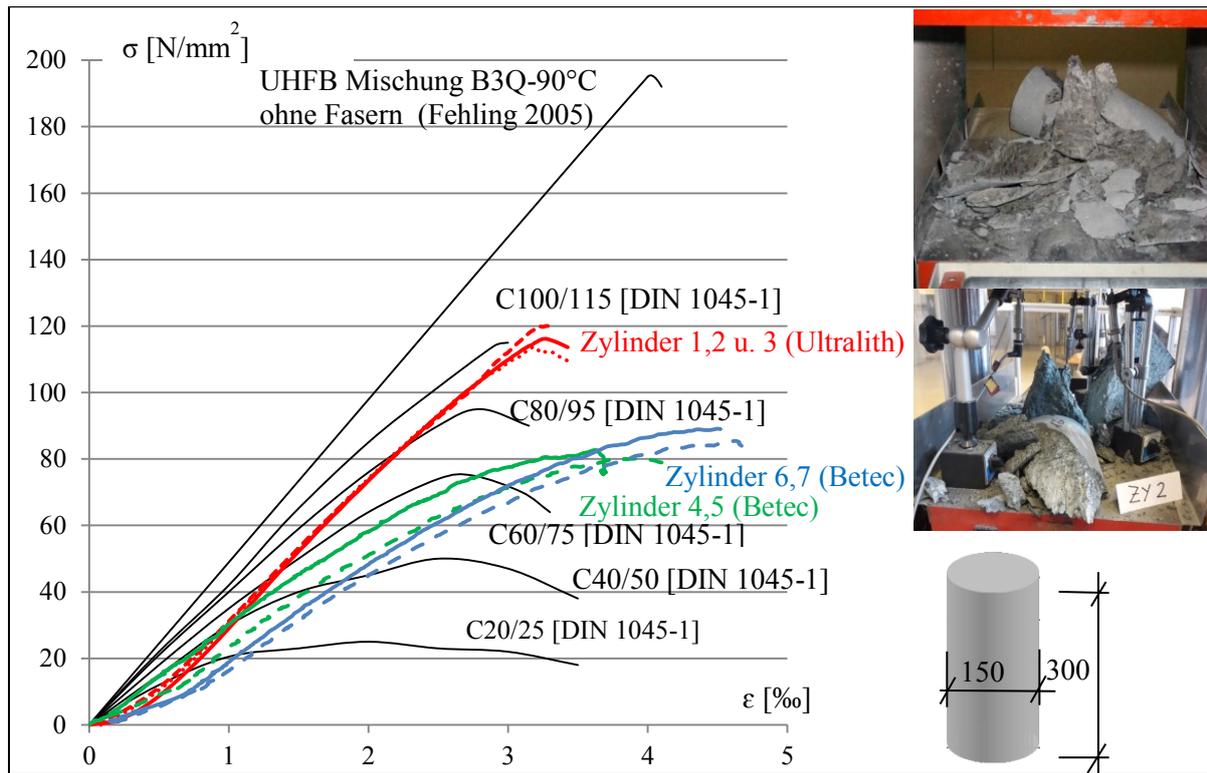


Abb. 4.2: Einordnung der verwendeten Betone unter Druckbeanspruchung und Vergleich mit Kennlinien aus der Literatur

Weiterführende Angaben zur Kennwertermittlung sowie die Dokumentation der Versuche sind Anhang B zu entnehmen.

4.2.2 Materialmodell Beton

Es wird ein zweidimensionales Materialmodell für den Werkstoff Beton verwendet. Nach (DIN EN 1992) steht das Parabel-Rechteck-Diagramm sowie das bilineare σ/ϵ -Diagramm zur Verfügung (Abb. 4.3). In AFGC (2002) wird die σ/ϵ -Beziehung im Druckbereich ebenfalls bilinear abgebildet (Abb. 4.4 links). Zusätzlich wird der Zugbereich über vier Punkte definiert. Tue/Schneider (2003) schlagen für UHFB einen linearen Verlauf vor (Abb. 4.4 rechts).

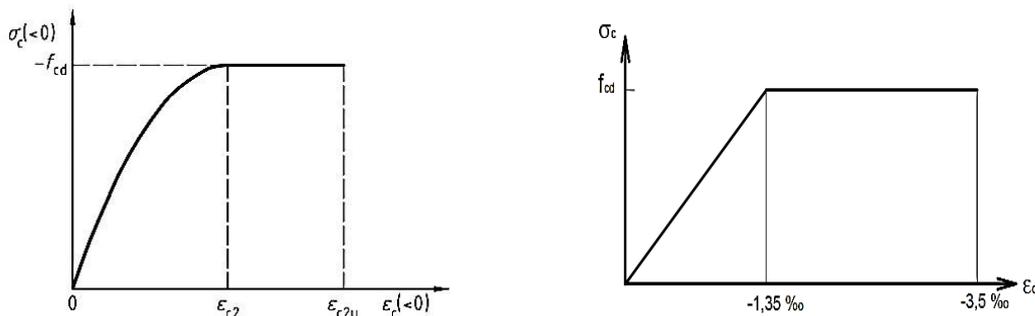


Abb. 4.3: Links: Parabel-Rechteck-Diagramm und rechts bilineares σ/ϵ -Diagramm nach (DIN EN 1992)

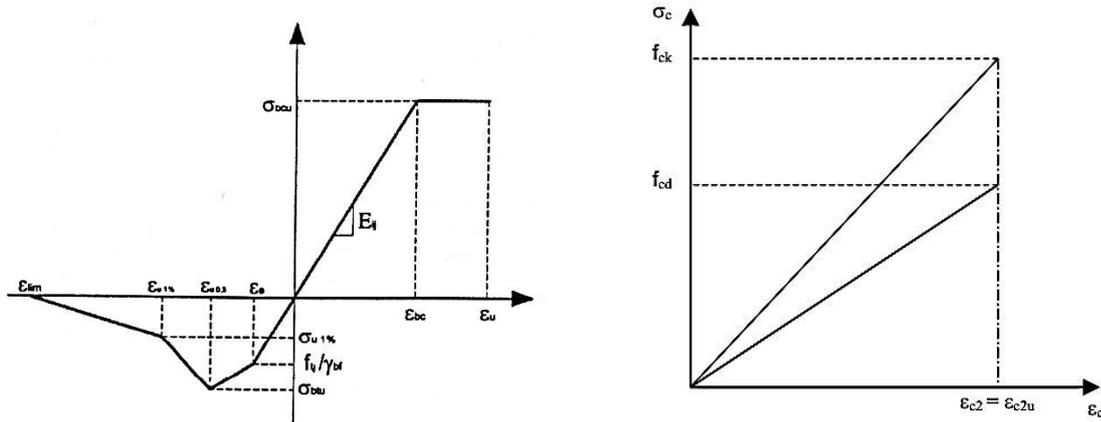


Abb. 4.4: Links: σ/ϵ -Beziehung nach (AFGC 2002); rechts: vorgeschlagene σ/ϵ -Beziehung für UHFB nach (Tue/Schneider 2003)

Für jeden Prüfkörpertyp mit Stahlzahnleistenpaar wird ein Referenzprüfkörper mit identischer Geometrie, jedoch ohne Zahnleisten, getestet. Die Referenzkörper zeigen ein nahezu linear elastisches Verhalten bis zum Bruch. Die daraus resultierenden Last-/Verformungsbeziehungen werden für das Betonmodell verwendet (Abb. 4.5). Somit können die Einflüsse aus Werkstoff und dem Verhalten aus der Geometrie möglichst realitätsnah abgebildet werden. Beim Prüfkörper „II/R2 (REF-70-2)“ ist ein geringfügig ausgeprägtes Nachbruchverhalten zu erkennen, das auf den 14cm breiten Prüfkörper mit Gewindestangen bzgl. Querkzug zurückzuführen ist. Beim Prüfkörper „II/R3 (REF-30-1)“ versagt der Prüfkörper im Lasteinleitungsbereich, kann aber trotzdem noch Last abtragen. Das zeigt der geringfügig ausgeprägte Nachbruchbereich. Für das Materialmodell wird nur der Bereich bis zur Maximallast verwendet.

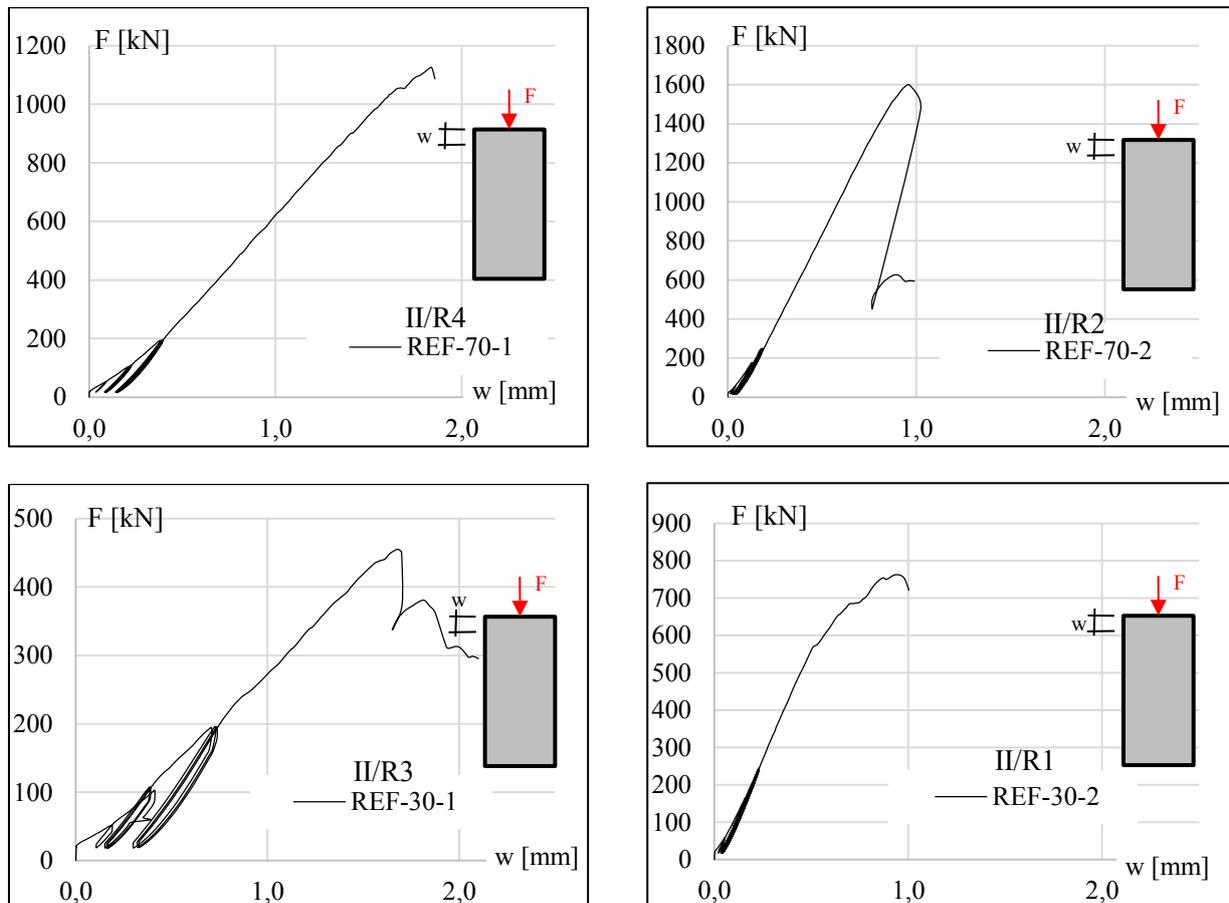


Abb. 4.5: Last-/Verformungskurve der Referenzprüfkörper aus Ultralith

4.3 Versuche an Betonprismen mit Zahnleistenpaaren

4.3.1 Versuche

Prüfkörper und Versuchsprogramm

Die Prüfkörper bestehen aus einen bzw. zwei Zahnleistenpaaren aus Stahl S235, die unter einem Winkel θ in ein Betonprisma eingebunden sind (vgl. Abb. 4.8 – 4.11). Bei dem verwendeten Beton handelt es sich um unbewehrten Ultralith, einem ultra-hochfestem selbstverdichtenden Beton der Firma Drössl, Siegen. Die Betonage der Prüfkörper erfolgt liegend, sodass beide Betonteile gleichzeitig hergestellt werden können. Die Prüfkörper werden mit feuchten Rollen nachbehandelt, bevor sie bis zur 28-Tage-Festigkeit an der Luft gelagert werden. Der ultra-hochfeste Beton schmiegt sich an die betonseitige Stahlverzahnung an. Es werden Prüfkörper mit einer Zahnleiste und Prüfkörper mit zwei Zahnleisten untersucht (Tab. 4.2). Der Kräfteverlauf bei den Prüfkörpern mit einer Zahnleiste erfolgt ohne Umlenkungen, sodass hier außer dem Beton keine zusätzlichen Einflüsse vorhanden sind. Die Zahnleiste und der Prüfkörper sind 5cm breit. Bei Versuchen mit zwei Zahnleistenpaaren beträgt die Tiefe der Zahnleisten 3,5 cm und der gesamte Prüfkörper 14 cm (Abb. 4.8 u. 4.9). Die Abmessungen des Prüfkörpers sind so gewählt, dass zwischen den beiden Zahnleistenpaaren ein Hohlraum von 7cm entsteht. Da auch bei Anschlusssituationen ein Hohlraum vorhanden ist, kann dieser somit abgebildet werden. Durch den Hohlraum entsteht eine Kraftumleitung und dadurch Querzug im Prüfkörper. Um diesen aufzunehmen werden je Prüfkörper vier Gewindestangen mit Unterlegscheibe und Mutter verwendet. Für jeden Prüfkörpertyp wird ein Referenzprüfkörper mit identischer Geometrie aus Beton untersucht. Der Hohlraum wird in den Referenzprüfkörpern ebenfalls hergestellt. Diese werden ohne Fuge in einem Stück betoniert, wobei anstelle der Zahnleisten Betonstege vorhanden sind. Um den Querzug aufzunehmen, werden ebenfalls Gewindestangen mit Unterlegscheiben verwendet. Die Lastabschätzung der Versuche wird in Falter (2018) beschrieben. Es wird der ungestörte Beton, die Lasteinleitung in die betonseitigen großen Stahlzähne und die feinen Stahlzähne betrachtet. Dabei wird ein duktiler Versagen der feinen Stahlzähne angestrebt, je nach Neigung der Druckstrebe aber auch der Beton maximal ausgenutzt.

Tab. 4.2: Versuchsprogramm Phase II – Betonprismen mit Stahlzahnleistenpaaren

Versuchsnr.	Anzahl PK	Anzahl ZL	n Zahn S/B	Tiefe ZL [cm]	n Zahn S/S	Fugen-neigung	Abmessungen PK			Material
							b [cm]	t [cm]	h [cm]	
II/R1	1	-	-	-	-	-	14	14	50	S235 Charge 1
II/R2	1	-	-	-	-	-	26	14	50	S235 Charge 1
II/R3	1	-	-	-	-	-	14	5	50	S235 Charge 1
II/R3	1	-	-	-	-	-	26	5	50	S235 Charge 1
II/P1	1	2	8	3,5	20 ^{*1}	30°	14	14	50	S235 Charge 1
II/P2	1	2	8	3,5	24	70°	26	14	50	S235 Charge 1
II/P3	1	1	8	5,0	12	30°	14	5	50	S235 Charge 1
II/P4	1	1	8	5,0	12	30°	14	5	50	S235 Charge 1
II/P5	1	1	8	5,0	12	70°	26	5	50	S235 Charge 1
II/P6	1	1	8	5,0	12	70°	26	5	50	S235 Charge 1

^{*1}) durch fehlerhaften Einbau tragen vier Zähne nicht mit
^{*2}) S/S = Stahl/Stahl-Verzahnung (feine Stahlverzahnung); S/B = Betonseitige große Stahlverzahnung
Hinweis: Die einzelnen Geometrien der Prüfkörper sind im Anhang D1 dargestellt.

Prüfeinrichtung

Prüfmaschine, Messsystem und Messtechnik:

Es werden dieselbe Prüfmaschine, das Messsystem und die Messtechnik, wie im Kapitel 3.8.2 beschrieben, verwendet. Die Versuchsdurchführung erfolgt in neun Lastrampen (Tab. 4.3).

Tab. 4.3: Laststufen für Prüfkörper mit einer und zwei Zahnleisten in kN

Rampe		1	2	3	4	5	6	7	8	9
1 ZL	Belastung	20	50	100			200			F _{Bruch}
	Entlastung	-	20	20			20			-
2 ZL	Belastung	20	50	150			250			F _{Bruch}
	Entlastung	-	20	20			20			-

Induktive Wegaufnehmer (IWA):

Die vertikalen Wege werden durch IWA an der Lasteinleitungsplatte gemessen (Abb. 4.7). Die horizontalen Wege werden analog der Stahlprismen auf der spitz zulaufenden Seite der Prüfkörperhälften aufgenommen. Um mit den IWA auf eine saubere und ebene Fläche zu messen, werden an den betonseitigen großen Zähnen der aus dem Beton hervortretenden Zahnleisten Stahlbleche aufgeklebt. Ferner werden die Wege parallel zur Fuge (axial) gemessen. Hierzu wird ein Plexiglasstreifen auf die obere Zahnleiste geklebt und daran der IWA befestigt. Auf die untere Zahnleiste wird ein Aluminiumwinkel geklebt, an dem über eine Bohrung und zwei Muttern eine Gewindestange befestigt ist. Rechtwinklig zur Gewindestange ist an der Stirnseite ein Aluminiumblech befestigt. Dieses wird in der Mitte des Prüfkörpers bzw. der Fuge platziert und dient als Kontaktplatte für den IWA der gegenüberliegenden Zahnleiste. Durch die Gewindestange kann das Aluminiumblech in der Lage verändert und somit genau platziert werden.

Dehnmessstreifen (DMS):

Zur Messung von Dehnungen im Zahngrund werden an vier feinen Stahlzähnen der Zahngruppen a und d je zwei DMS 1-LY11-0,3/120 im Zahngrund angebracht. Da dort wenig Platz zur Verfügung steht, werden ein DMS je Zahn auf der Vorderseite und ein DMS je Zahn auf der Rückseite des Prüfkörpers angebracht (Abb. 4.6).

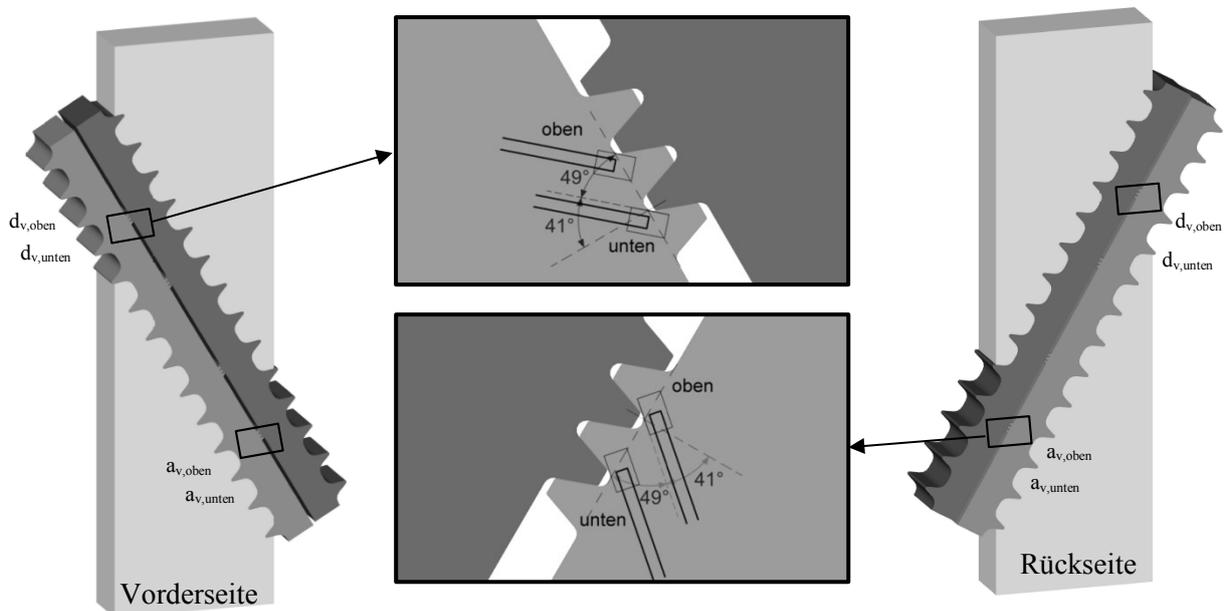


Abb. 4.6: Lage der Dehnmessstreifen nach Hofmann (2017)

Versuchsaufbau und - durchführung

Die Prüfkörper werden mittig in der Prüfmaschine platziert und ausgerichtet. Beim Erreichen von 20 kN wird nochmals die Ausrichtung des Prüfkörpers kontrolliert, da sich ab dieser Last die Kalotte feststellt. Der Prüfkörper wird mit neun Lastrampen belastet (Tab. 4.3).

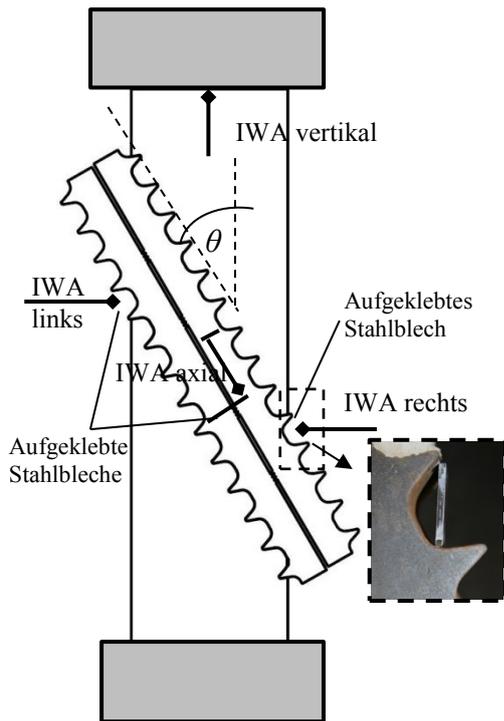


Abb. 4.7: Links: Lage der induktiven Wegaufnehmer (IWA) an den Prismenhälften nach Hofmann (2017); Rechts: Probekörper mit IWA horizontal und axial in der Prüfmaschine

4.3.2 Versuchsergebnisse und Auswertung

Versuchsbeobachtungen

II/R1 u. II/P1: Prüfkörper 30° mit zwei Zahnleistenpaaren

Bei der Herstellung des Prüfkörpers II/P1 ist eine der beiden Zahnleisten aus Versehen um einen der feinen Zähne versetzt in der Schalung platziert. Aktiviert und bis zum Versagen belastet werden somit auf einer Seite 4x3 Zahnreihen und auf der anderen Seite 4x2 Zahnreihen. Die erwartete Bruchlast beträgt unter Berücksichtigung der aktivierten Zahnreihen 443 kN (vgl. Falter et al. 2018), erreicht werden 398,6 kN. Der Grund für die um etwa 11% niedriger liegende Bruchlast kann die unterschiedliche Steifigkeit der beiden Zahnleisten, aufgrund der unterschiedlich aktivierten Zahnreihenanzahl, sein.

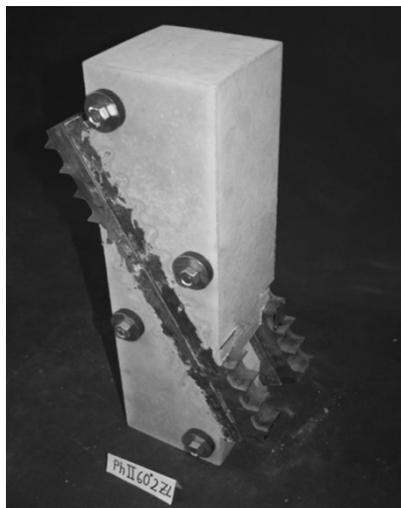


Abb.4.8: Prüfkörper II/P1 (links) und II/R1 (mitte) und Bruchbild der Stahlzähne (rechts)

Die übertragbare Kraft kann hier je Zentimeter Einzelzahnlänge mit $q_{sz}=5,7 \text{ kN/cm}$ angegeben werden. Die Werte beziehen sich auf den durchgeführten Versuch. Das entspricht einer Spannung in der verzahnten Fuge von etwa 164 N/mm^2 . Die Kraft ist dabei auf die schräge Fläche der Fuge bezogen. (Abb. 4.9). Es entstehen keine Quersugrisse im Beton.



Abb.4.9: Definition der Fläche der Fuge

II/R2 u. II/P2: Prüfkörper 70° mit zwei Zahnleistenpaaren

Der Prüfkörper II/P2 zeigt aufgrund der großen Lasten (Bruchlast $1577,1 \text{ kN}$) im oberen und unteren Betonbauteil Quersugrisse (Abb. 4.10 rechts). Die Betonzugfestigkeit reicht nicht aus, um den Querszug aufzunehmen. Die feinen Stahlzähne verformen sich sehr stark. Die Last-Verformungskurve fällt nach Erreichen der Maximallast ab, bildet jedoch einen Nachbruchbereich aus (Abb. 4.15). Die Bruchlast des Referenzkörpers - ohne Zahnleisten - liegt bei $1663,9 \text{ kN}$ und ist somit etwa $6,4\%$ höher als der Prüfkörper mit Zahnleisten. Demzufolge kommt die aufnehmbare Kraft im Bereich der betonseitigen großen Stahlzähne nahe an den außerhalb der geometrischen Diskontinuitäten liegende Betonquerschnitt dieser Geometrie heran. Bei reiner Betrachtung der „Betonstege“ mit den Abmessungen von zweimal $260 \times 35 \text{ mm}$, ergibt sich eine Betondruckspannung von etwa 90 N/mm^2 . Diese liegt, bedingt durch die geometrischen Diskontinuitäten um etwa 34% unterhalb der Zylinderdruckfestigkeit von 121 N/mm^2 . Die übertragbare Kraft kann hier je Zentimeter Einzelzahnlänge mit $q_{sz}=18,8 \text{ kN/cm}$ angegeben werden. Das entspricht einer Spannung in der verzahnten Fuge von etwa 542 N/mm^2 (Abb. 4.9).

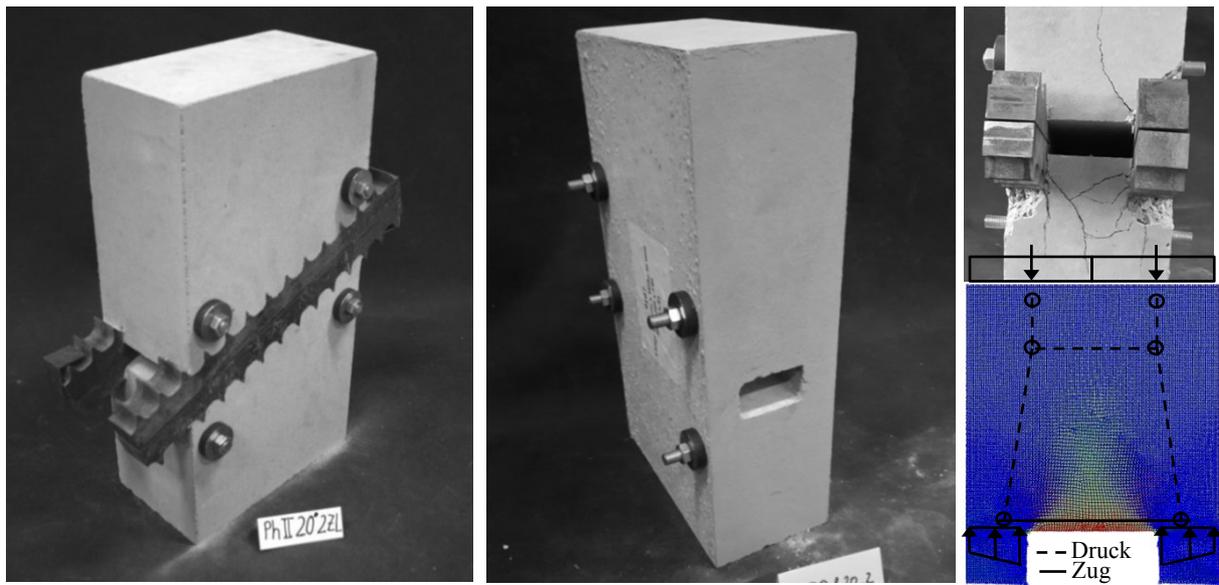


Abb.4.10: Prüfkörper II/P2(links)und II/R 2 (mitte); Hauptspannungsvektoren am Prüfkörper mit Stabwerksmodell Risse aus Querszug (links)

II/R3 u. II/P3 u. 4: Prüfkörper 30° mit einem Zahnleistenpaar

Der Prüfkörper II/R3 wird einmal und die Prüfkörper II/P3 u. 4 mit zwei identischen Prüfkörpern getestet. Die Referenzprüfkörper II/R3 versagen bei einer Versuchslast von 471 kN. Die Versuchslasten der Prüfkörper mit Zahnleistenpaar betragen 383,8 kN und 373,2 kN und sind damit sehr nah an der aus den Versuchen zur Zahngeometrie (Phase I) linear interpolierten erwarteten Prüflast von 379,4 kN (Abweichung unter einem Prozent). Die Versuchskörper versagen, indem sich die feinen Stahlzähne soweit verformen, dass die beiden Zahnleisten übereinander hinweggleiten. Beim Verformungsverhalten der Stahlzähne zeigen sich die Auswirkungen der Herstelltoleranzen des Wasserstrahlschneidens. Die Verformung zeigt sich auf der Wasserstrahleintrittsseite als Biegeverformung der Stahlzähne, auf der Wasserstrahlauftrittsseite scheren die Stahlzähne teilweise ab (Abb. 4.11). Die übertragbare Kraft kann hier je Zentimeter Einzelzahnlänge mit $q_{sz}=6,4$ kN/cm angegeben werden. Das entspricht einer Spannung in der verzahnten Fuge von etwa 185 N/mm² (Abb. 4.9).

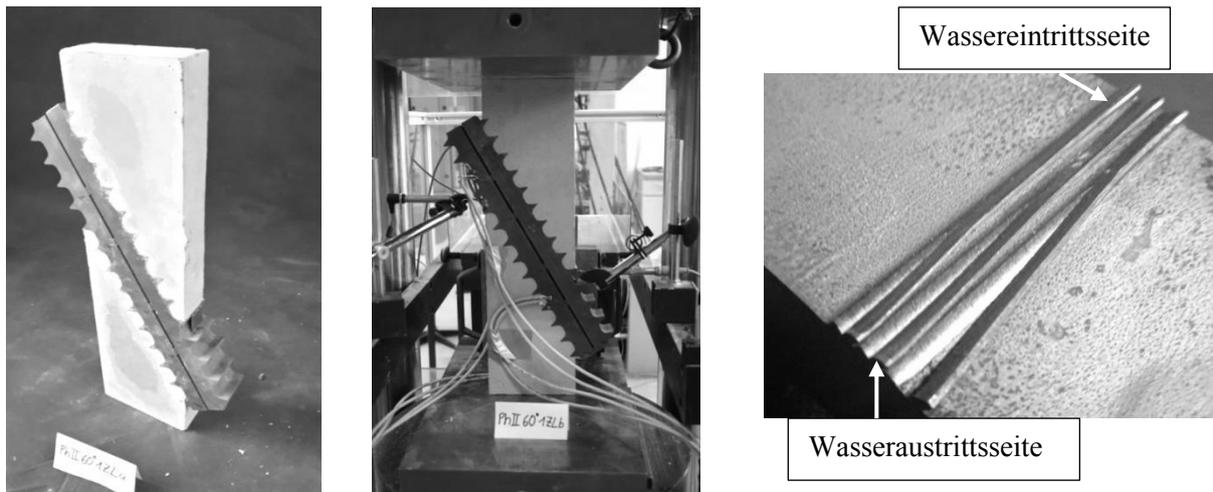


Abb. 4.11: Prüfkörper II/P3 (links) und II/P 4 mit DMS in der Prüfmaschine (mitte) und Bruchbild (rechts)

II/R4 u. II/P5 u. 6: Prüfkörper 70° mit 1 Zahnleistenpaar

Auch hier werden ein Referenzprüfkörper II/R4 sowie zwei identische Prüfkörper II/P5 u. 6 mit Zahnleistenpaaren getestet. Die Bruchlast des Referenzkörpers liegt bei 1168,8 kN, was einer Bruchspannung von etwa 90 N/mm² entspricht. Die Prüfkörper mit Zahnleisten versagen durch Betonbruch bei 1030,3 kN und 1058,6 kN (Abb. 4.12). Das entspricht einer Betonspannung von etwa 80 N/mm². Die Bruchlasten der Prüfkörper mit Zahnleistenpaaren liegen etwa 10-13% unterhalb des Referenzprüfkörpers. Das Versagen tritt bei beiden Versuchskörpern mit Zahnleistenpaaren im Bereich der Lasteinleitung auf (Abb. 4.12). Der Beton erhält durch die eingebaute Zahnleiste, insbesondere im Bereich der betonseitigen großen Stahlverzahnung, keine Schwächung oder negativen Einflüsse auf das Tragverhalten. Die feine Stahlverzahnung verformt sich sichtbar, jedoch wäre in den Zähnen eine weitere Laststeigerung möglich. Der Spalt zwischen den Zahnleisten ist weiterhin vorhanden und parallel. Die Zahnleisten haben in diesem Bereich keine merklichen globalen Biegeverformungen erhalten (Abb. 4.13).

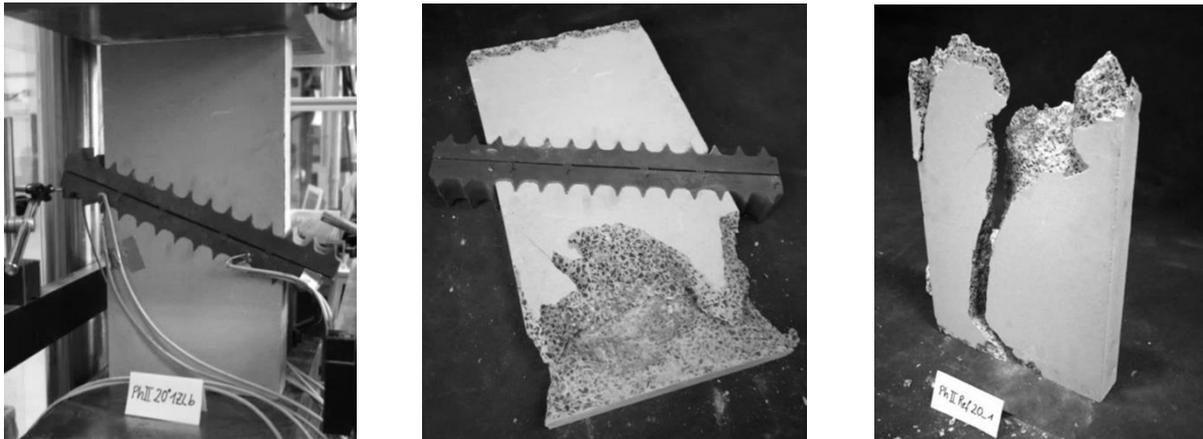


Abb. 4.12: Prüfkörper II/P6 mit DMS in der Prüfmaschine (links) und Bruchbild (mitte); Bruchbild Referenzprisma II/R4 (rechts)

Die Fertigungsgenauigkeit durch das Wasserstrahlschneiden ist auf der Wassereintrittsseite größer als auf der Wasseraustrittsseite. Die Eintrittsseite und die Austrittsseite des Wasserstrahls sind an den Prüfkörpern deutlich zu erkennen (Abb. 4.13). Die übertragbare Kraft kann hier je Zentimeter Einzelzahnlänge mit $q_{sz}=17,4 \text{ kN/cm}$ angegeben werden. Damit liegt diese um 8% unterhalb jener mit zwei Zahnleisten. Dies ist mit der Schädigung des Betons zu erklären. Die übertragbare Spannung in der verzahnten Fuge beträgt etwa 500 N/mm^2 (Abb. 4.9).

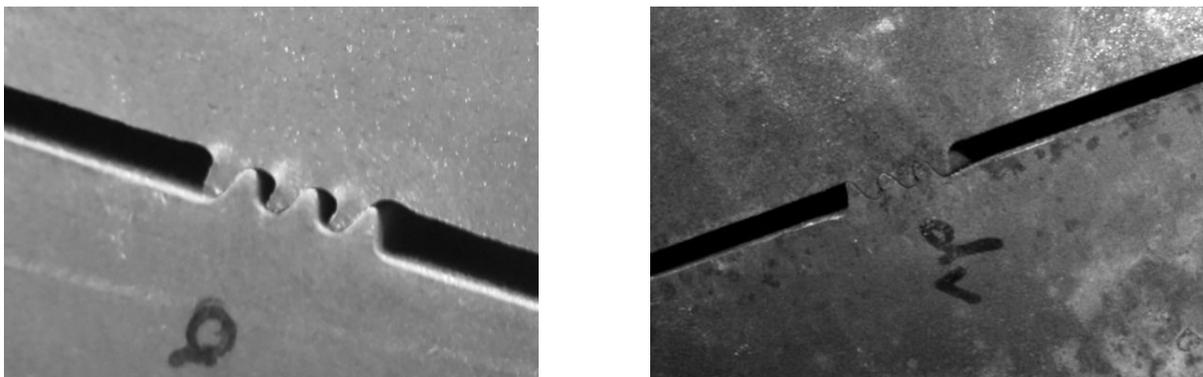


Abb. 4.13: Verformte Zähne Stahl–Stahl nach dem Versuch unter $\theta = 70^\circ$; links ist die Austrittsseite und rechts die Eintrittsseite des Wasserstrahls

Bewertung von Einflüssen

Einfluss der Lastneigung bei der im Beton eingebetteten Zahnleiste:

Das Trag- und Verformungsverhalten der feinen Stahlzähne verhält sich ähnlich wie das der gezahnten Stahlprismen der Versuche zur Zahngeometrie (Phase I), da sich auch hier bei der 30° Neigung ein gleitendes Versagen einstellt. Bei der 70° geneigten Zahnleiste verformen sich die Zähne, jedoch findet hier das maßgebende Versagen im Beton statt. Trotzdem verformen sich auch hier die Zähne sehr stark. Die feine Stahlverzahnung der eingebetteten Zahnleisten verhält sich während des Versuchs bis zum Betonversagen wie die feine Stahlverzahnung in Phase I.

Einfluss des angrenzenden Betons:

Da sich die Zähne bei beiden Lastneigungswinkeln ähnlich wie die Stahlprismen in Phase I verhalten, hat der angrenzende Beton keinen negativen Einfluss auf das Last- und Verformungsverhalten der Stahlzahnleiste bzw. der feinen Stahlverzahnung. Die Kräfte verteilen sich bei allen Prüfkörpern konstant an den Stahlzähnen. Das lässt bei einem plastischen Verhalten der Stahlzähne auf eine gleichmäßige Spannungsverteilung im Beton, in der Lasteinleitung der betonseitigen großen Stahlverzahnung sowie der Stahlzahnleiste schließen.

Einfluss des Zwischenraumes zwischen den Zahnleisten:

Die Zahnleistenpaare werden in der Regel mit einem Abstand zueinander im Druckknoten eines Bauteils eingebaut. Dies führt zu Querkzugbeanspruchungen. Im Prüfkörper II/P2 sind Querkzugrisse trotz

der Querkzugverstärkung durch Gewindestangen mit Muttern und Unterlegscheiben aufgetreten. Beim Prüfkörper *II/P1* sind keine Querkzugrisse aufgetreten. Die Prüflast ist hier aufgrund des Lastneigungswinkels ($\theta=30^\circ$) kleiner. Somit können die Kräfte aus Querkzug vollständig von der Betonzugfestigkeit aufgenommen werden. Ein sich negativ auswirkender Einfluss auf die Traglast aus Querkzug wird bei beiden Prüfkörpern nicht festgestellt.

Messergebnisse

Für den Kraftneigungswinkel $\theta=30^\circ$ kann eine Kraft je Zentimeter Einzelzahnlänge von etwa $q_{sz}=6,0\text{kN/cm}$ bzw. etwa 170N/mm^2 und für den Kraftneigungswinkel $\theta=70^\circ$ eine Kraft $q_{sz}=17,0\text{kN/cm}$ bzw. etwa 500N/mm^2 aufgenommen werden (Abb. 4.9). Diese Spannung liegt oberhalb der Zugfestigkeit des Zugversuchs (Kap. 3.5.1, Anhang B1). Dies ist mit der wahren Spannung zu begründen.

Tab.4.4 Versuchsergebnisse im Überblick

		Versagen
	max Drucklast [kN] (Rechnerisch)	Betonversagen
	Druckfestigk. Beton [N/mm ²]	Betonversagen
	Betonquerschnitt [cm ²]	Betonversagen
	Tiefe [cm]	Betonversagen
	Breite [cm]	Betonversagen
	Bruchspannung im Betonquerschnitt [N/mm²]	Betonversagen
	Bruchlast kN pro cm Einzelzahnlänge (Exp.)	Betonversagen
	Versuchslast Fres (Exp.) [kN]	Betonversagen
	Versuchslastkomponente F _l (Exp.) [kN]	Gleiten der Stahlzähne
	Versuchslastkomponente F _⊥ (Exp.) [kN]	Betonversagen
	Kraftwinkel [°]	Gleiten der Stahlzähne
	Breite Zähne [cm]	Gleiten der Stahlzähne
	Anzahl Zähne [n]	Betonversagen
	Bezeichnung	Betonversagen
II/R1	Betonreferenzprisma 14/14/50cm	Betonversagen
II/R2	Betonreferenzprisma 26/14/50cm	Betonversagen
II/R3	Betonreferenzprisma 14/5/50cm	Betonversagen
II/R4	Betonreferenzprisma 26/5/50cm	Betonversagen
II/P1	St/St/Bet_2ZL 30°; 14/14/50cm	Gleiten der Stahlzähne
II/P2	St/St/Bet_2ZL 70°; 260/14/50cm	Betonversagen
II/P3	St/St/Bet_1ZL 30°; 14/5/50cm	Gleiten der Stahlzähne
II/P4	St/St/Bet_1ZL 30°; 14/5/50cm	Gleiten der Stahlzähne
II/P5	St/St/Bet_1ZL 70°; 260/5/50cm	Betonversagen
II/P6	St/St/Bet_1ZL 70°; 260/5/50cm	Betonversagen

k.A. = keine Angabe

4.4 Numerische Untersuchungen zur Stahlverzahnung an Betonprismen mit Zahnleistenpaaren

4.4.1 Simulationsmodell

Die Kleinversuche (Phase II) an den Betonprismen mit Zahnleistenpaaren werden in einem dreidimensionalen Modell mit der Finite-Element-Methode geometrisch nichtlinear sowie physikalisch nichtlinear simuliert. Dabei werden die Berührflächen der einzelnen Elemente zueinander als Kontakte mit Kontaktbedingungen definiert. An diesen können Druckkräfte und Reibkräfte übertragen werden. Der Kontakt zwischen Beton und betonseitigen großen Stahlzahn (betonseitig) wird über einen unverschieblichen Verbund definiert. Die feine Stahlverzahnung wird mit einem Reibbeiwert von $\mu=0,2$ simuliert. Es werden dabei die Werkstoffmodelle aus Kapitel 3.5 und 4.2 sowie die Simulationsgrundlagen aus Kapitel 3.6 angewendet. Der Versuchskörper wird auf der Unterseite eingespannt (M, H, V ist fixiert) gelagert. Auf der Lasteinleitungsseite wird der Prüfkörper horizontal gehalten und bezüglich des Moments M fixiert. Die Vertikallast wird als konstante Flächenlast auf die Stirnseite des Prüfkörpers aufgegeben (Abb. 4.14).

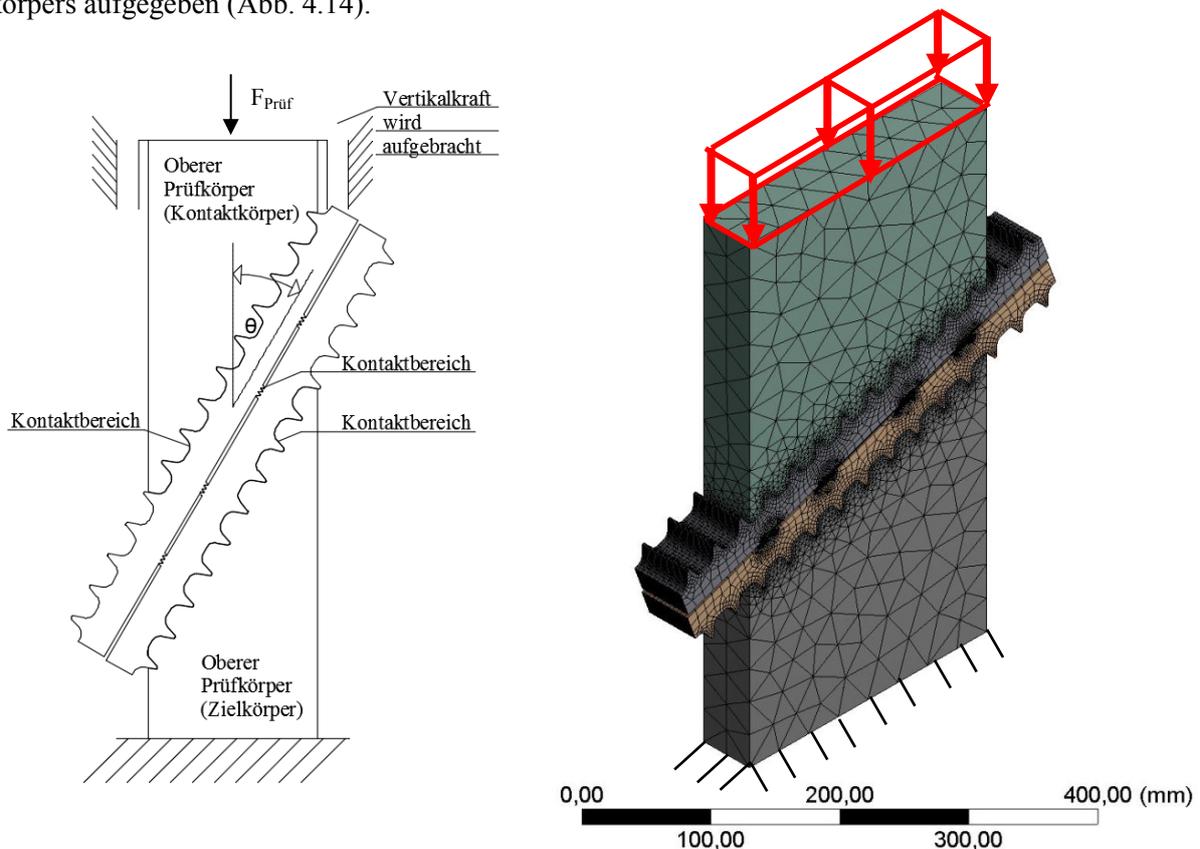


Abb. 4.14: Simulationsmodell/Statistisches System Phase II (links) und FE-Netz (rechts)

4.4.2 Simulationsergebnisse

Versuchsnachrechnungen - Arbeitslinien

Die Nachrechnungen der Versuche zeigen bis auf den Prüfkörper II/P1 eine gute Übereinstimmung mit den Graphen der experimentellen Versuchsdurchführungen (Abb. 4.15). Generell sind die Arbeitslinien der FE-Simulationen steiler, was mit der exakt abgebildeten Zahngeometrie begründet wird. Die Versuchskörper weisen Fertigungstoleranzen auf, weshalb auch effektiv weniger Stahlquerschnittsfläche der Zähne zur Verfügung steht. Die relativ flach verlaufende Arbeitslinie des Versuchs II/P1 ist mit der einseitig um einen Zahn versetzten Zahnleiste zu begründen. Dadurch wird der gesamte Prüfkörper ungleichmäßig belastet und besitzt damit eine geringere Steifigkeit. Die Arbeitslinie der FE-Simulation des Prüfkörpers II/P1 ist deutlich steiler. Beim Versuch II/P2 verlaufen beide Arbeitslinien bis etwa 1000kN parallel, danach nehmen die Verformungen des Versuchs überproportional zu bis bei 1577kN die Maximallast erreicht ist.

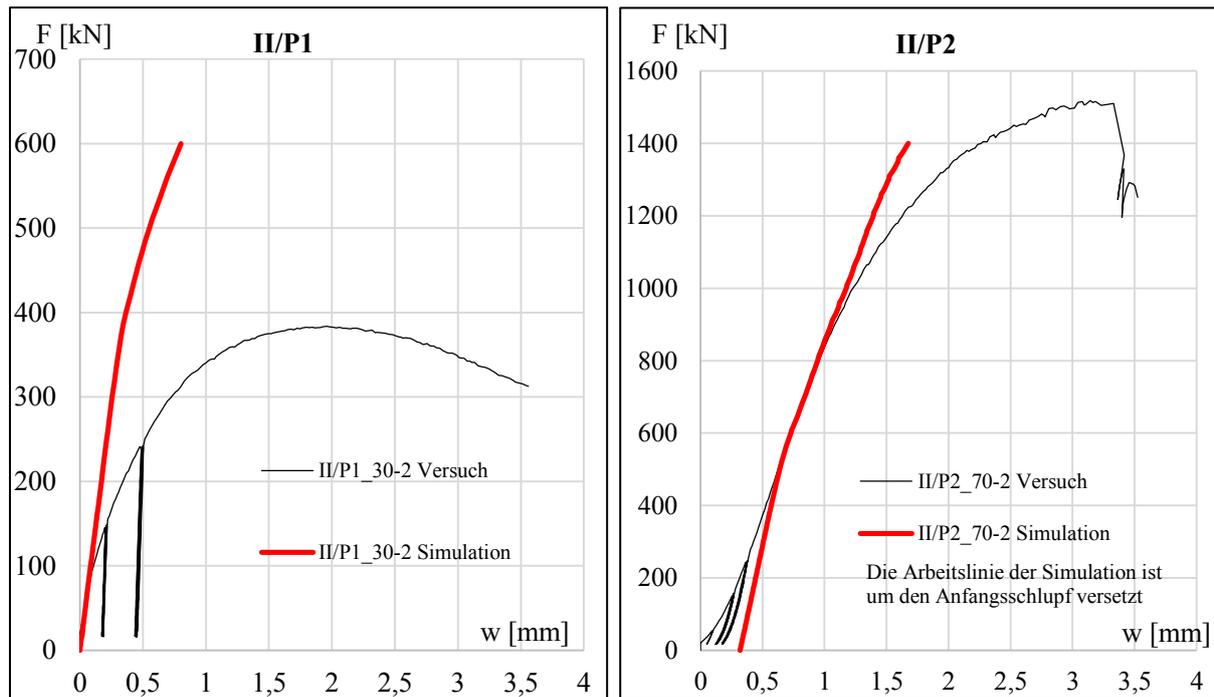


Abb. 4.15: Last-/Verformungskurve der FE-Rechnungen und Versuche für die Prüfkörper II/P1 und II/P2

Die Arbeitslinien der beiden Versuche II/P3 stimmen sehr gut überein. Die FE-Rechnung bildet den linearen Bereich nahezu bis zur Maximallast sehr gut ab, der plastische Bereich sowie das Nachbruchverhalten werden nicht abgebildet, was am Abbruch der FE-Rechnung liegt. Aufgrund der für die numerische Rechnung großen Verformungen im Kontaktbereich wird kein Konvergentes Verhalten erreicht. Der Versuch II/P4b zeigt eine größere Anfangsverformung. Diese kann aus einem größeren Schlupf resultieren. Ab 200kN verlaufen die Arbeitslinien der Versuche parallel. Die Arbeitslinie der FE-Berechnung stimmt sehr gut mit den Versuchen überein.

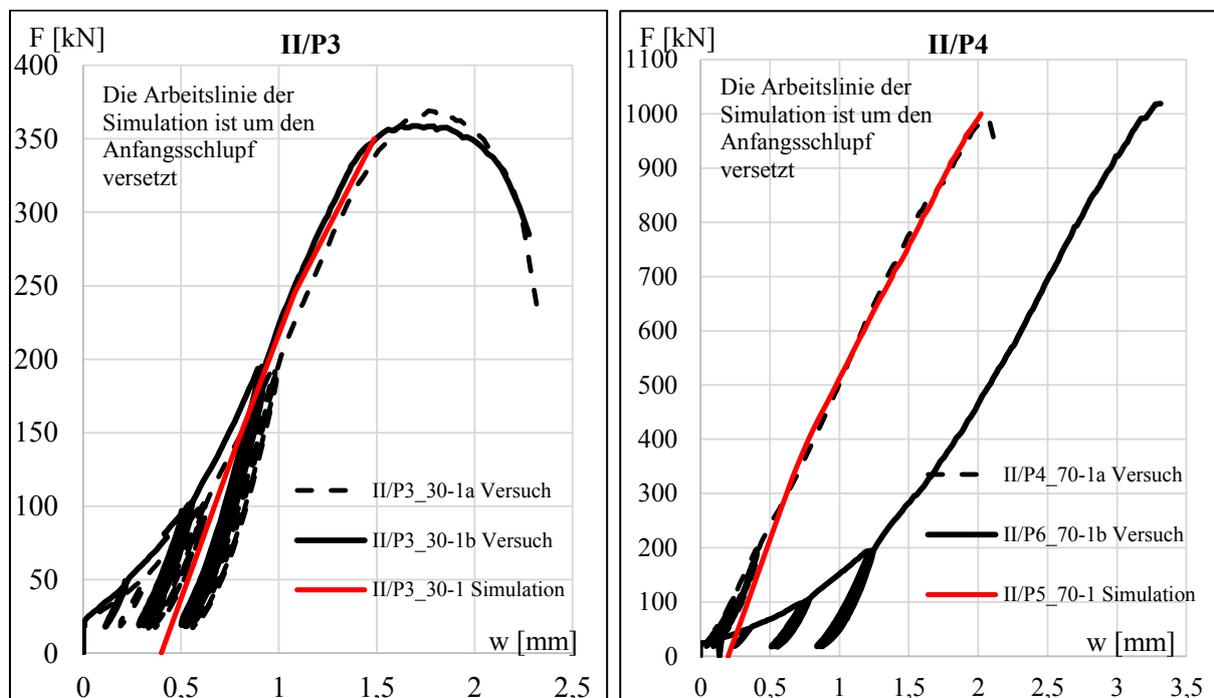


Abb. 4.16: Last-/Verformungskurve der FE-Rechnungen und Versuche

Durch die Aufteilung der feinen Stahlzähne in Zahngruppen, soll eine weitgehend konstante Spannungsverteilung im Prüfkörper – sowohl im Betonquerschnitt als auch in den Stahlzähnen – erreicht

werden. Die gleichmäßig verformten Stahlzähne in allen Zahngruppen sowie die Vergleichsspannungen in der FE-Rechnung bestätigen, dass dies erreicht wird (Abb. 4.17).

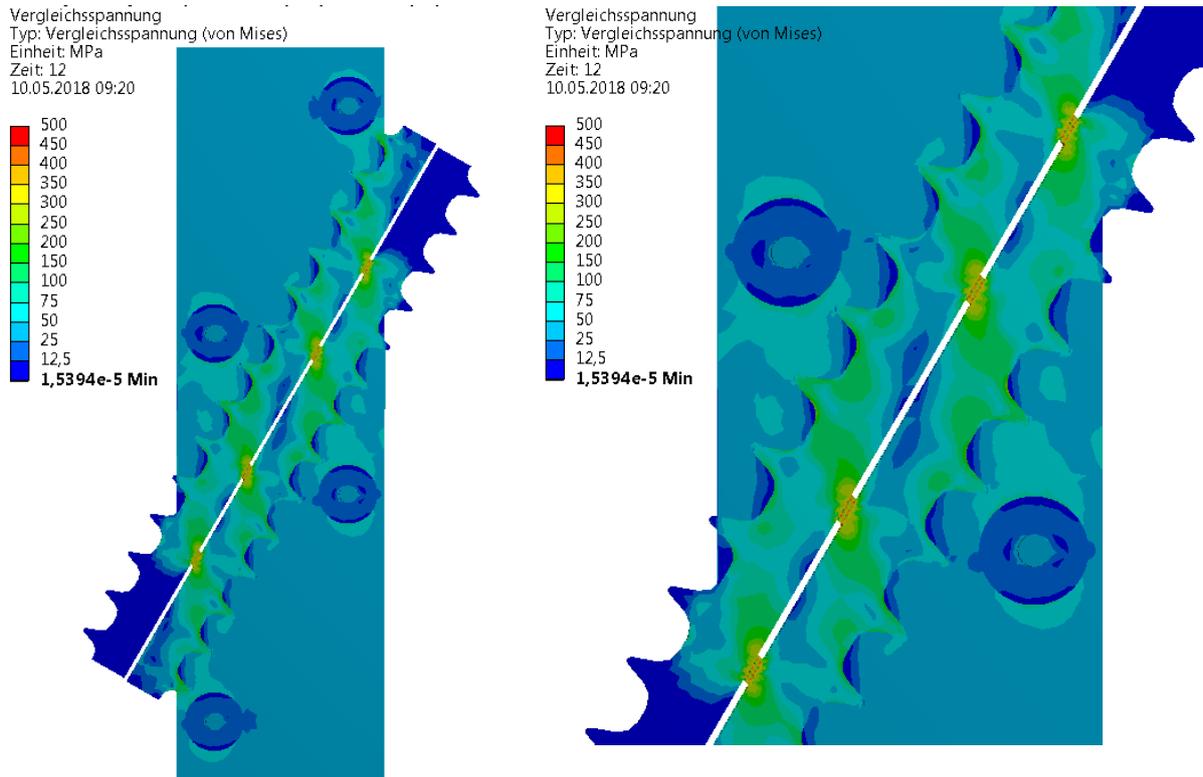


Abb. 4.17: Vergleichsspannung im Prüfkörper (links) und detaillierter dargestellt an den Stahlzähnen, exemplarisch für den Prüfkörper IIP1 (30°, 2ZL)

Auch bei den Betonprismen mit Zahnleistenpaaren zeigt sich die s-förmige Ausprägung des Prüfkörpers.

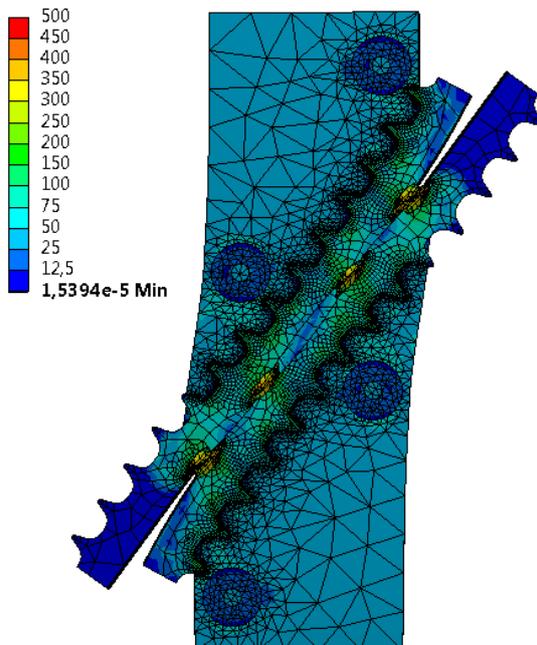


Abb. 4.18: Verformung des Prüfkörpers 80-fach überhöht dargestellt

4.5 Zusammenfassung zur duktilen Verbindung

Das Verbindungskonzept aus Kapitel 2 besteht aus einer betonseitigen großen Stahlverzahnung auf der Betonseite und einer feinen Stahlverzahnung, an der die beiden Stahleinbauteile die Kräfte von einem Bauteil zum anderen übertragen.

Die Prüfkörper bestehen aus einen sowie zwei Zahnleistenpaaren aus Stahl S235, die unter einem Winkel $\theta=30^\circ$ und $\theta=70^\circ$ in ein Betonprisma eingebunden sind. Diese Winkel stellen die untere und obere Grenze der praktischen Anwendung dar. Für Prüfkörper mit einem Zahnleistenpaar sind die Zahnleisten und das Betonprisma 50mm breit. Die Prüfkörper mit zwei Zahnleistenpaaren sind 140mm breit, die beiden Zahnleistenpaare jedoch nur jeweils 35mm, sodass ein Hohlraum von 70mm vorhanden ist. Hohlräume bzw. Abstände zwischen Zahnleisten sind in der zu entwickelnden Verbindung auch vorhanden. Deshalb wird der Prüfkörper gezielt mit Hohlraum konstruiert. Durch die Kraftumlenkung entsteht Querzug im Beton. Dieser wird durch Gewindestangen aufgenommen. Beim Prüfkörper mit Kraftneigungswinkel $\theta=70^\circ$ entstehen aufgrund der großen Kraft Querzugrisse.

Das Trag- und Verformungsverhalten der feinen Stahlzähne verhält sich ähnlich wie die gezahnten Stahlprismen der Versuche zur Zahngeometrie (Phase I), da sich auch hier bei der 30° Neigung ein gleitendes Versagen einstellt. Bei der 70° geneigten Zahnleiste verformen sich die Zähne, jedoch findet hier das maßgebende Versagen im Beton statt. Trotz des angrenzenden Betons verteilen sich die Spannungen in den Stahlzähnen konstant. Das grundsätzliche Tragverhalten der Stahlverzahnung ist wie jenes der Versuche an Stahlprismen (Phase I). Die in Zahngruppen aufgeteilten Stahlzähne haben keinen negativen Einfluss auf den angrenzenden Beton.

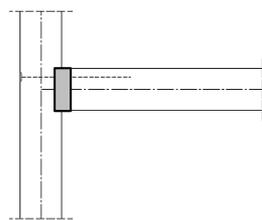
Die Kleinversuche (Phase II) an den Betonprismen mit Zahnleistenpaaren werden in einem dreidimensionalen Modell mit der Finite-Element-Methode geometrisch nichtlinear sowie physikalisch nichtlinear simuliert. Die Nachrechnungen der Versuche zeigen bis auf den Prüfkörper II/P1 eine gute Übereinstimmung mit den Graphen der experimentellen Versuchsdurchführungen (Abb. 4.15). Generell sind die Arbeitslinien der FE-Simulationen steiler, was mit der exakt abgebildeten Zahngeometrie begründet wird.

5. Einsatz der Zahnleiste im Stahlbeton-Fertigteilbau

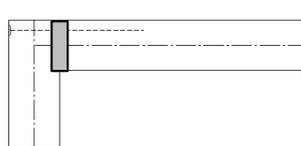
5.1 Allgemeine Anwendungsmöglichkeiten

Hoch- und Ingenieurbau:

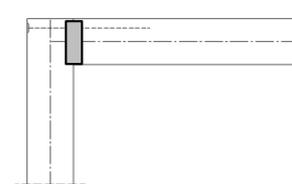
Es gibt vielfältige Möglichkeiten, die modulare Verbindung im Hoch- und Ingenieurbau einzusetzen. Sobald zwei Stahlbetonbauteile aneinander treffen, müssen diese kraftschlüssig verbunden werden. Gerade der Stahlbetonfertigteilbau kann von der modularen Verbindung profitieren. Da die Verbindung wenig Platz benötigt, eignet sich diese insbesondere bei stabförmigen Bauteilen. Die modulare Konsole und der modulare Fachwerkträger sind bereits in den Kapiteln 1 und 2 als Anwendung genannt. Weitere Beispiele sind die Anschlüsse Riegel an Stütze und Hauptträger an Nebenträger, bei denen, anders als bei der Konsole und dem Fachwerkknoten, zwei lange stabförmige Bauteile aufeinandertreffen (Abb. 5.1). Außerdem ist es auch möglich, Stäbe an flächige Elemente zu fügen, wie es beim Anschluss einer Diagonale an eine Wand der Fall ist.



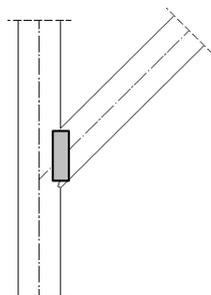
Anschluss Fertigteil-Riegel an eine Fertigteil-Stütze



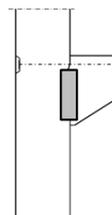
Anschluss Fertigteil-Hauptträger an einen Fertigteil-Nebenträger



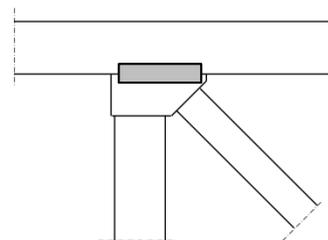
Anschluss Fertigteilbinder an eine Fertigteilstütze, z. B. Ausbildung biegesteifer Rahmenecken oder eine Stütze als Auflager für vier Dachbinder



Anschluss einer Fertigteil-diagonale an eine Wand



Anschluss Fertigteilkonsole an Fertigteilstütze



Fachwerkknoten

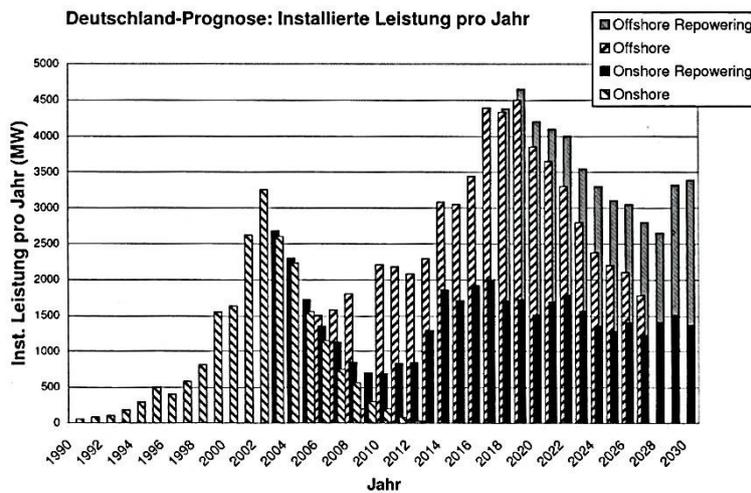
Abb. 5.1: Beispiele für die Anwendung von Hochleistungsverbindungen mit Verzahnung

Das Prinzip die Bauteile miteinander zu fügen ist bei allen Anwendungen gleich. Die unter einem Winkel θ angreifende Kraft wird über die gezahnten Stahleinbauteile von einem Bauteil zum anderen geleitet. Die notwendige Lagesicherung bzw. Zugkomponente wird durch ein vorgespanntes Zugelement (Gewindestab) hergestellt.

Windkraftanlagen:

Auch in Hybridtürmen von Windkraftanlagen kann die Zahnleiste verwendet werden. Hybridtürme bestehen im unteren Bereich aus Betonelementen und im oberen Bereich aus einem Stahlelement. Die Betonelemente sind teilweise so groß, dass diese nicht in einem Stück transportiert werden können. Deshalb wird ein Betonring auf der Baustelle aus zwei oder drei Schalenelementen zusammengesetzt und in der Vertikalfuge vergossen. Die einzelnen Betonsegmente werden nach dem Aushärten der Vergussfuge aufeinander gesetzt und vertikal vorgespannt. Die Vorspannung kann dabei intern (im Beton) oder extern (im Inneren des Turmes) verlaufen.

Windenergieanlagen (WEA) mit einer Höhe von 140m werden als Hybridtürme hergestellt, da reine Stahltürme aufgrund der Transportmaße nur bis ca. 100m Höhe sinnvoll eingesetzt werden können. Da die Freigabe von neuen Standorten immer seltener ist, müssen bereits bestehende Anlagen durch neue, größere Anlagen ersetzt werden (Repowering). Daher wird in Zukunft das Repowering der Anlagen einen stetig wachsenden Marktanteil erlangen (Abb. 5.2). Der bisherige Rückbau der WEA ist teuer.



Extern vorgespannte Betonsegmente werden nach dem Entfernen der Vorspannung mit einem Kran heruntergehoben und vor Ort abgebrochen, da ein Abtransport der Betonringe aufgrund des großen Durchmessers nicht möglich ist. Bei Konstruktionen mit interner Vorspannung muss die gesamte Anlage gesprengt werden. In beiden Fällen ist eine Verwendung der Betonelemente nur noch als gebrochenes Material, beispielsweise im Straßenbau, zu verwenden.

Abb. 5.2: Installierte Leistung aus Windenergie pro Jahr in Deutschland (Grünberg, Göhlmann 2011)

Um die Betonringe nach dem Rückbau abtransportieren zu können und somit die Möglichkeit zu haben, diese an anderer Stelle wieder zu verwenden, kann die in dieser Arbeit entwickelte modulare Verbindung verwendet werden. Die Drittel- bzw. Halbschalen werden dabei ohne Verguss zu einem Betonring gefügt. Die Tangentialkräfte in der vertikalen Betonfuge werden über die gezahnten Stahleinbauteile übertragen. Die Lagesicherung übernimmt eine Verschraubung (Abb. 5.3). Somit wäre eine modulare Konstruktion für Hybridtürme möglich und hohe Rückbaukosten vor Ort können entfallen.

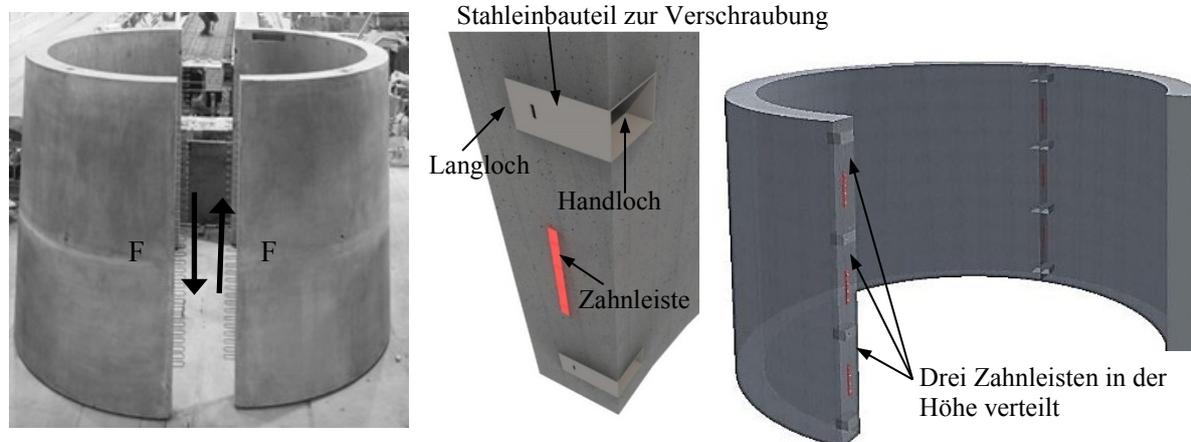


Abb. 5.3: Aktuelle Ausführung über Verguss (links) (Max Bögl) und Schubkraftübertragung über Stahlzahnleisten (mitte u. rechts) nach Völkel (2016)

Auswahl von zwei Anwendungen für die Versuche im Maßstab 1 zu 1:

Von den genannten Anwendungen werden die Konsole und der Fachwerkknoten im Maßstab 1 zu 1 getestet. Beim Anschluss Konsole an Stütze müssen, im Gegensatz zum Anschluss Träger an Stütze, keine zusätzlichen Einflüsse aus der Verformung des Trägers berücksichtigt werden. Deshalb ist die Konsole die erste getestete Verbindung. Im weiteren Schritt wird der Fachwerkknoten untersucht. Dieser ist komplexer, da drei Stäbe an einem Knotenelement aneinander treffen. Damit wird das Trag- und Verformungsverhalten an zwei Anwendungen untersucht.

5.2 Anwendung Konsole

Ziel und Vorgehensweise

Ziel ist es eine Grundlage für die Versuche sowie die Bemessung der modularen Konsole anhand von Bemessungsmodellen monolithischer Konsolen sowie der modularen Konsole nach Schwitzke (2011), zu schaffen. Das Kapitel 2 gibt einen Überblick zur Entwicklung der Konsolen. Darauf aufbauend werden im Folgenden die Funktionsweise und die erforderlichen Nachweise einer monolithischen Konsole aufgezeigt. Ferner werden Hinweise aus der Arbeit von Schwitzke (2011) an einer modularen Konsole insbesondere hinsichtlich der Bügelbewehrung gegeben. Auf dieser Grundlage wird die modulare Konsole mit dem gezahnten Stahleinbauteil entworfen. In einem weiteren Schritt werden Versuche an Konsolen aus der Literatur betrachtet und darauf aufbauend ein Versuchsaufbau für die modulare Konsole entworfen, berechnet und konstruiert.

Konstruktion und Funktionsweise

Das Tragverhalten von Konsolen ist von der Geometrie abhängig. Konsolen werden wie folgt eingeteilt:

- Sehr kurze Konsole $e/h_c \leq 0,2$
- Kurze Konsole $0,2 < e/h_c \leq 0,5$
- Schlanke Konsole $0,5 < e/h_c \leq 1,0$
- Sehr schlanke Konsole $1,0 < e/h_c \leq 1,5$

Obwohl es mehrere Bemessungsmöglichkeiten gibt, um Konsolen zu dimensionieren (vgl. Kapitel 2), ist das Grundprinzip – das Stabwerkmodell – immer gleich. Die Belastung wird in die Konsole eingeleitet. An dieser Stelle wird ein Druck-Zug-Druck-Knoten definiert, da hier diese Druckkraft in der Konsole über eine Druckstrebe abgeleitet wird und gleichzeitig ein Zugstab den Knoten im Gleichgewicht hält (Abb. 5.4). Der Zugstab wird an der Konsolvorderkante sowie in der Stütze verankert. Die Druckstrebe verläuft unter dem Winkel θ in die Stütze. Dort wird ein Druck-Druck-Druck-Knoten definiert. Da sich die Druckstrebe flaschenförmig ausbreitet, entsteht Querkzug. Dieser muss je nach Konsolgeometrie mit Horizontalbügel und Vertikalbügel aufgenommen werden.

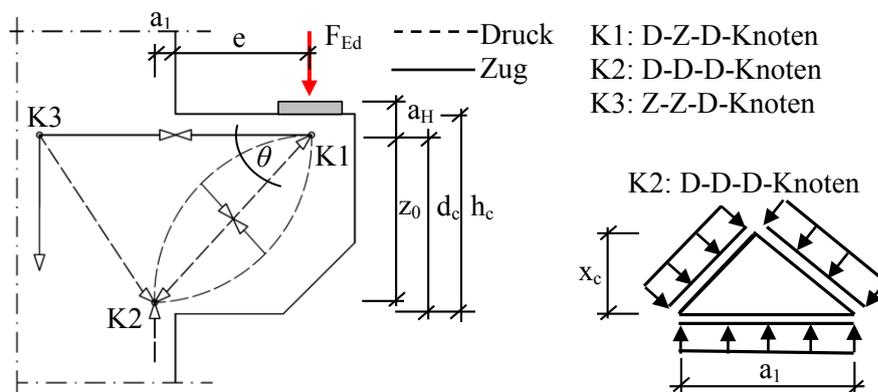


Abb. 5.4: Stabwerkmodell einer Konsole

Exemplarisch wird die Nachweisführung nach Reineck (2005) aufgeführt (Tab. 5.1). Diese dient als Referenz für den Bemessungsansatz der modularen Konsole.

Tab. 5.1: Nachweisführung nach Reineck (2005)

Nachweis	Einwirkende Spannung	Widerstand	Ausnutzung
Lagerpressung und Verankerung des Zuggurtes (Zug-Druck-Knoten)	$\sigma_{Ed} = \frac{F_{Ed}}{A_{Platte}}$	$\sigma_{Rd} = 0,95 \cdot f_{cd}$	$\sigma_{Ed}/\sigma_{Rd} \leq 1$
Zugstrebe	$F_{tEd} = F_{Ed} \cdot \cot \theta$ $\sigma_{Ed} = \frac{F_{tEd}}{\sum A_{Zugbewehrung}}$	$\sigma_{Rd} = \frac{f_{yd}}{\gamma_{M0}}$ $\gamma_M = 1,15$	$\sigma_{Ed}/\sigma_{Rd} \leq 1$
Druckstrebe, Druck-Druck-Druck-Knoten	Begrenzung der Druckzonenhöhe x_c : $x_c \leq \begin{cases} 0,4d & \text{für } f_{ck} \leq 50\text{N/mm}^2 \\ \left(0,5 - \frac{f_{ck}}{500}\right) \cdot f_{cd} & \text{für } f_{ck} > 50\text{N/mm}^2 \end{cases}$	$\sigma_{Rd} = 0,95 \cdot f_{cd}$	$\sigma_{Ed}/\sigma_{Rd} \leq 1$
Dimensionierung der Bügel	$e \leq 0,5 \cdot z_0$ $A_{sw, \text{horizontal}} \text{ für } F_{Bü, \text{hor.}} = 0,2 \cdot F_{Ed}$ $a_c > 0,5 \cdot z_0$ $A_{sw, \text{vertikal}} \text{ für } F_{Bü, \text{ver.}} = \frac{2}{3} \cdot \left(\frac{a}{z} - \frac{1}{2}\right) \cdot F_{Ed}$		

Modulare Konsolen werden ebenfalls mit einem Stabwerksmodell nachgewiesen. Während bei der monolithischen Konsole die Lage und Ausdehnung des D-D-D-Knoten je nach Bemessungsmodell in Abhängigkeit der Last definiert wird, ist dieser bei der modularen Konsole durch den Druckkontakt vorgegeben. Für die Zugstrebe wird eine Gewindestange, anstelle von Zugbewehrung, verwendet. In Kositz (2010) und Schwitzke (2011) werden Stabwerkmodelle zur Aufnahme der Querzugspannungen beschrieben und diskutiert. Dem Bemessungsvorschlag von Schwitzke liegen folgende Aussagen zugrunde (Bezeichnungen nach Schwitzke (2011)):

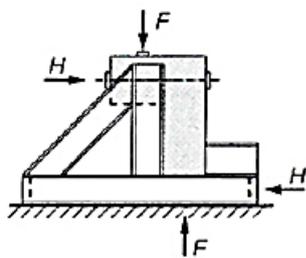
- „Die Größenordnung der Spaltzugkraft T2 wird in Abhängigkeit zur Beanspruchung T2/F oder zum Bewehrungsgrad des Zuggurtes $A_{s, \text{Bü}}/A_s$ angegeben.
- Es ist zwischen horizontal und vertikal angeordneten Bügeln zu unterscheiden: Ab dem Verhältnis $a_c/d_c = 0,88$ (Stabwerksmodell) bzw. ab dem Verhältnis $a_c/d_c = 0,95$ (linear-elastische FE-Analyse) ist die vertikale Anordnung von Bügeln vorteilhafter.
- Horizontale Bügel sind mit mindestens 60% der Auflagerkraft zu bewehren. Bei vertikaler Anordnung sind 80% der Auflagerkraft anzusetzen.
- Zusätzlich ist eine konstruktive Bewehrung gemäß Abb. 5-34 (Schwitzke) anzudnen.“ (Schwitzke 2011, S.103)

Aufgrund der ähnlichen Funktion der modularen Konsole dieser Arbeit mit der aus Schwitzke (2011) wird in Kapitel 9, der Bemessungsvorschlag von Schwitzke für die Dimensionierung der Bügel verwendet.

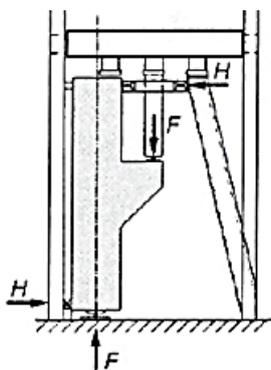
Versuche an Konsolen in der Literatur

Generell werden in der Literatur drei Versuchsaufbauten verwendet, um die Tragfähigkeit von Konsolen zu testen (Abb. 5.5). Mit dem asymmetrischen Anschluss kann eine einzelne Konsole untersucht werden. Dabei muss der Versuchsaufbau rückverankert werden. Beim symmetrischen Anschluss hingegen werden immer zwei Konsolen getestet. Eine Rückverankerung ist nicht notwendig, da die Konstruktion im Gleichgewicht ist. Es wird davon ausgegangen, dass die Prüflast auf beide Konsolen zu gleichen Teilen wirkt. Das Ergebnis ist eine Interaktion beider Konsolen. Eine dritte Möglichkeit ist ein horizontal platzierter Konsolen-Stützen-Anschluss. Hier wird die Konstruktion in den Hallenboden rückverankert.

Asymmetrische Prüfkörper

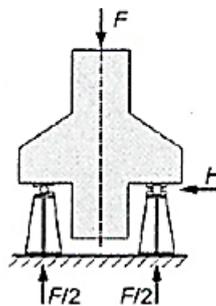


(Schürmann 1985)

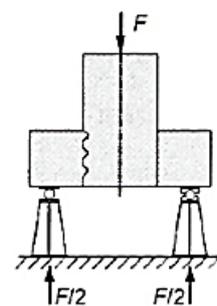


(Niederhoff 1961)

Symmetrische Prüfkörper

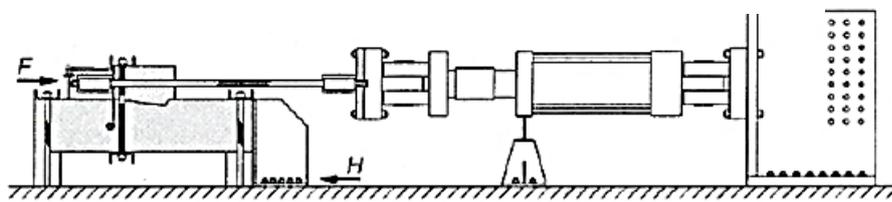


(Birkle et al. 2001)



(Hegger et al. 2004)
(Schwitzke 2011)

Horizontal platzierte asymmetrische Prüfkörper



(Schwitzke 2011)

Abb. 5.5: Versuchsstände anderer Forscher aus der Literatur nach Schwitzke (2011)

Es wird ein asymmetrischer Versuchsaufbau in Anlehnung an Niederhoff entworfen (vgl. Kapitel 6). Damit ist es möglich, eine Konsole ohne den Einfluss einer weiteren Konsole zu untersuchen. Um die Verformungen aus der Hilfskonstruktion möglichst gering zu halten, wird ein massives Stahlbetonwiderlager hergestellt (Abb. 6.4).

Die durchgeführten Versuche werden mit den Traglasten aus der Literatur verglichen. Dazu ist in der Anlage G eine Versuchsdatenbank aufgeführt.

5.3 Anwendung Fachwerkknotenpunkt

Ziel und Vorgehensweise

In Kapitel 2.1.3 werden der aufgelöste Fachwerkknoten nach Henze (2009), rautenförmige Elemente nach Wechsler (1986) und Wabenrahmen nach HTA Association (k.A.) als Beispiele für die Ausführung von Knotenkonstruktionen aufgeführt. Der Fachwerkknoten nach Henze (2009) soll als Grundlage für die Versuche am Fachwerkknoten im Maßstab 1 zu 1 dienen.

Konstruktion und Funktionsweise

Der modulare Fachwerkträger besteht aus dem Ober- und Untergurt, den Pfosten, der Diagonalen und den Knotenelementen. An den Knotenelementen stoßen alle Elemente stumpf aneinander. Die Pfosten sind Druckelemente, die Diagonalen Zugelemente. Die Pfosten werden mit einer Gewindestange vorgespannt und somit die Reibung zwischen Gurt und Knotenelement hergestellt. Die Zugdiagonale wird ebenfalls mit einer Gewindestange vorgespannt. Diese ist in den Knotenelementen durch eine Stahlplatte verankert.

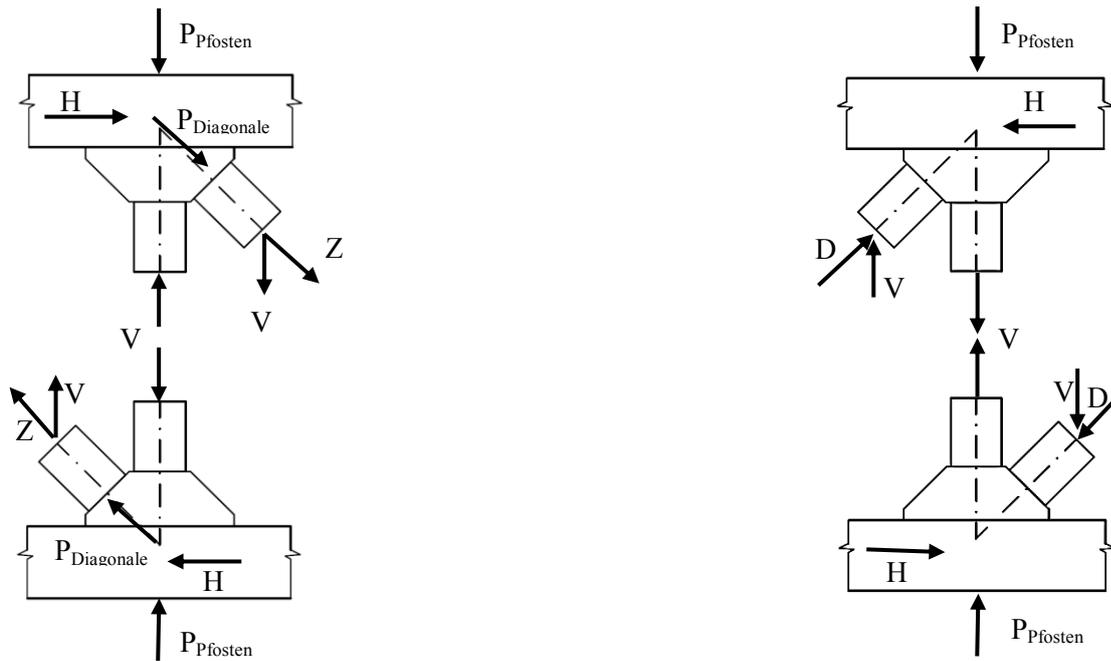


Abb. 5.6: Kräfte am Fachwerkknoten nach Henze (2009) links und nach Falter et al. (2018) rechts

Versuche in der Literatur

Henze untersucht zunächst den Reibungsverbund zwischen den UHPC-Betonoberflächen an kleinformatigen Prüfkörpern. Die dabei gemessenen Reibbeiwerte betragen zwischen $\mu=0,6$ bis $\mu=0,8$. Darauf aufbauend werden die Knotenpunktversuche anhand eines liegenden Versuchsaufbau durchgeführt (Abb. 5.7). Dabei wird eine Pfostenvorspannung von 500kN aufgebracht. Der Gurt wird ebenfalls mit 500kN vorgespannt. Allerdings dient die Gurtvorspannung nur der Lagesicherung des Versuchsaufbaus. Beide Kräfte werden während des Versuchs konstant gehalten.

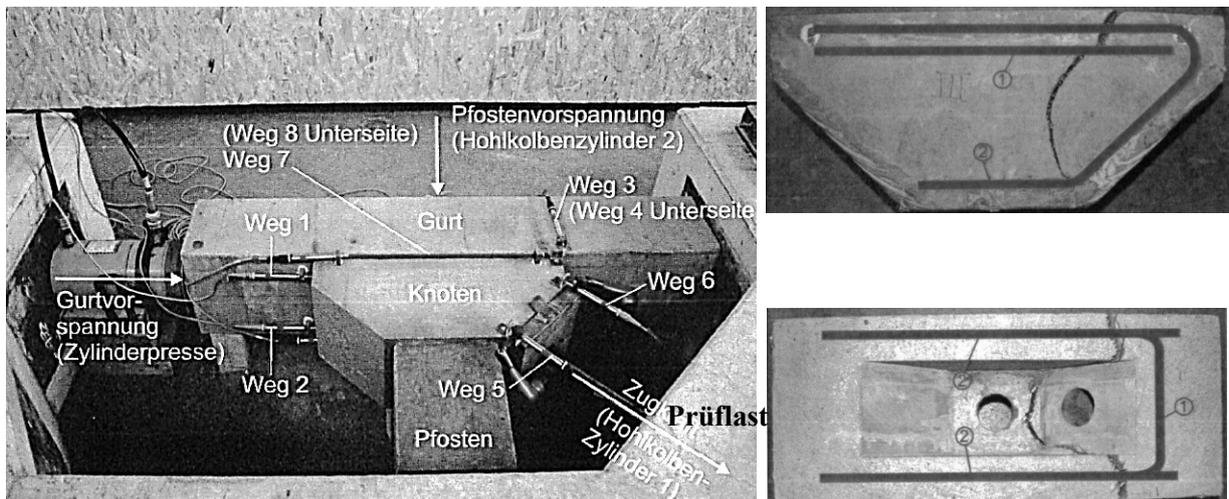
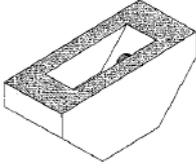
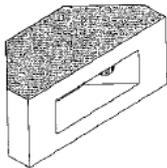
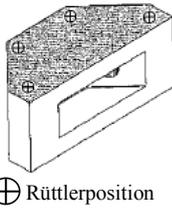
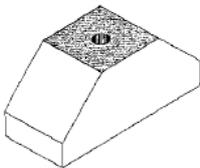


Abb. 5.7: Knotenpunktversuch (links) und Bruchversagen sowie daraus resultierende Bewehrung (rechts)(Henze 2009)

Henze führt vier Versuchsserien am Knotenpunkt durch. In Serie 1 werden vier Knotenelemente mit Stahlfasern bewehrt getestet. Dabei werden vier Betonagetechnologien (BT) (Tab. 5.2) verwendet. In den Serien 2 bis 4 wird der Knotenpunkt zusätzlich mit Stabstahl bewehrt (Tab 5.3). Alle Versuche sind in Henze (2009) ausführlich beschrieben und in Falter et al. (2018) zusammengefasst.

Tab. 5.2: Betonagetechnologien (BT) nach Henze (2009)

Betonagetechnologie	BT1	BT2	BT3	BT4
Darstellung  Betonierte Oberseite = Einfüllseite Beton			 ⊕ Rüttlerposition	
Neigung	45°			
Verdichtung	Durch Fließfähigkeit des Betons	Durch Fließfähigkeit des Betons	Zusätzlich durch Innenrüttler	Durch Fließfähigkeit des Betons
Beton	UHPC: Stahlfasergehalt 2,8 Vol.-% (UHPC Typ F1, vgl. (Henze 2009))			

Tab. 5.3: Traglasten der Knotenpunktversuche nach Henze (2009)

Bezeichnung	Prüflast [kN]	Versagen	Bewehrung, Neigung Diagonale
Serie 1.1	221	Rissbildung	Stahlfaser, 45°, BT1
Serie 1.2	325	Rissbildung	Stahlfaser, 45°, BT2
Serie 1.3	226	Rissbildung	Stahlfaser, 45°, BT3
Serie 1.4	412	Rissbildung	Stahlfaser, 45°, BT4
Serie 2.1	525	Reibungsverbund $\mu=0,61$	Stahlf.+Stabstahl, 45°
Serie 3.1	516	Reibungsverbund $\mu=0,70$	Stahlf.+Stabstahl, 45°
Serie 3.2	450	Reibungsverbund $\mu=0,68^{*1}$	Stahlf.+Stabstahl, 45°
Serie 3.3	460	Reibungsverbund $\mu=0,55$	Stahlf.+Stabstahl, 45°
Serie 4.1	515 ^{*1}	Reibungsverbund $\mu=0,86^{*1}$	Stahlf.+Stabstahl, 30°
Serie 4.2	475 ^{*1}	Reibungsverbund $\mu=0,80^{*1}$	Stahlf.+Stabstahl, 30°
Serie 4.3	450 ^{*1}	Reibungsverbund $\mu=0,77^{*1}$	Stahlf.+Stabstahl, 30°
^{*1} aus Diagramm abgelesen			

Die Versuchslasten von Henze dienen als Referenzwerte, um die Schubkraftübertragung der gezahnten Fuge mit derer einer Reibungsfuge zu vergleichen. Auf dieser Grundlage wird ein Versuchsaufbau für einen Fachwerkknoten mit Druckdiagonale entworfen. Aufgrund der vorhandenen Prüfmaschine an der TU Berlin wird ein Versuchsaufbau mit vertikaler Lastaufbringung konstruiert. Dabei muss die Diagonale senkrecht im Versuchsstand platziert werden. Dafür wird der Fachwerkknoten um 45° gedreht auf ein massives Stahlbetonwiderlager gesetzt. Dieses ist im Hallenboden der Peter Behres-Halle verspannt.

5.4 Zusammenfassung zum Einsatz der Zahnleiste

Im Hoch- und Ingenieurbau gibt es vielfältige Anwendungsmöglichkeiten für die modulare gezahnte Verbindung (Abb. 5.1). Desweiteren besteht auch die Möglichkeit, das gezahnte Stahleinbauteil für die Fügung von Schalenelementen (vertikale Fuge) bei Windkraftanlagen einzusetzen. Aus den Anwendungen werden die Konsole und der Fachwerkknoten für die Versuche im Maßstab 1 zu 1 gewählt. Für beide Anschlussituationen wird die Funktionsweise aufgezeigt und ein Überblick zu bereits durchgeführten Versuchen an derartigen Konstruktionen gegeben. Es werden die Versuchsaufbauten und die Prüflasten angegeben. Die Versuchsaufbauten sind die Grundlage zu den Überlegungen der eigenen Versuchskonstruktionen. Die Prüflasten (Tab. 5.3) dienen dazu, die eigenen Versuche einzuordnen. Die aus diesen Grundlagen entwickelten Versuchsaufbauten sind in den Kapiteln 6 (Konsole) und 7 (Fachwerkknoten) dargestellt.

6. Versuche und Simulation zu modularen Konsolen mit Zahnleisten aus Stahl

6.1 Versuche Konsole

6.1.1 Konzeption des Versuchsaufbau

Die Versuche an Konsolen im Maßstab 1 zu 1 werden in der Peter Behrens Halle der TU Berlin durchgeführt. Die Versuche werden an einem 1,60m hohen Stützenschnitt mit den Abmessungen $b=45\text{cm}$ und $t=40\text{cm}$ mit einer einseitig angebrachten Konsole durchgeführt (Abb. 6.1). Um die Versuchskonstruktion ohne nennenswerte Verformungen der Haltekonstruktion testen zu können, wird ein Widerlager entworfen, berechnet und konstruiert. Die Konzeption des Versuchsaufbau inkl. des Widerlagers ist in Falter et al. (2018) beschrieben.

6.1.2 Prüfprogramm zur Konsole

Tab. 6.1: Prüfprogramm Bauteilversuche an Konsole (Phase III)

Versuchs-nr.	Zahn-geometrie	Anordnung der Zähne	n Zahn S/B	n Zahn S/S	Kraft-neigung	Abmessungen Kon.			Material Stahl	Material Beton
						a_c [cm]	t [cm]	h_c [cm]		
III/V1	GT5	Gruppen	12	36	28	30,5	40	68	S 1	Ult
III/V2	GT5	Gruppen	12	36	28	30,5	40	68	S 1	Ult
III/V3	GT5	Gruppen	12	36	33	30,5	40	68	S 1	Ult
III/V4	GT5	Gruppen	8	24	47	30,5	40	33	S 2	Bet
III/V5	GT5	Konzentriert	8	24	47	30,5	40	33	S 2	Bet
III/V6	GT3	Konzentriert	8	10	47	30,5	40	33	S 2	Bet

Ult = Ultralith S1 = Stahl S235 Charge 1
Bet = Betec S2 = Stahl S235 Charge 2

Die Breite der Zahnleiste beträgt bei allen Konsolen 35mm. Je Anschluss werden zwei Zahnleistenpaare verwendet.

6.1.3 Prüfkörper

Die Verbindung besteht aus einer Konsole und einer Stütze (Abb. 6.1). In beiden Bauteilen sind die in den ersten beiden Versuchsphasen entwickelten Stahleinbauteile platziert. Für den Anschluss Konsole an Stütze werden zwei 35mm breite Zahnleistenpaare verwendet. Über diese wird die Kraftübertragung von der Konsole in die Stütze realisiert. An der feinen Stahlverzahnung wird die Konsole an die Stütze gesetzt und mit zwei Gewindestangen M30-10.9 vorgespannt. Die Vorspannung wird mit einem Drehmomentschlüssel aufgebracht. Es werden die Vorspannkraft, die Anzahl der Zähne und die Anordnung der Zähne verteilt über die Leiste (Zahngruppen oder Konzentration der Zähne auf einen Zahnabschnitt) variiert. Zusätzlich wird noch eine weitere Zahngeometrie (GT3) getestet (Tab. 6.1 u. Abb. 6.1 u. Abb. 6.2).

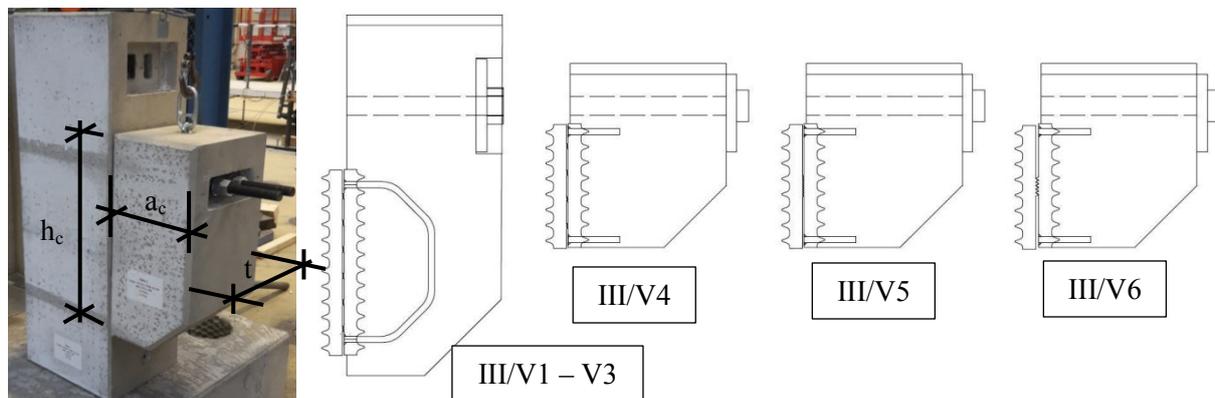


Abb. 6.1: Versuchskörper – Stütze und Konsole (links) und Darstellung der Konsolen (rechts)

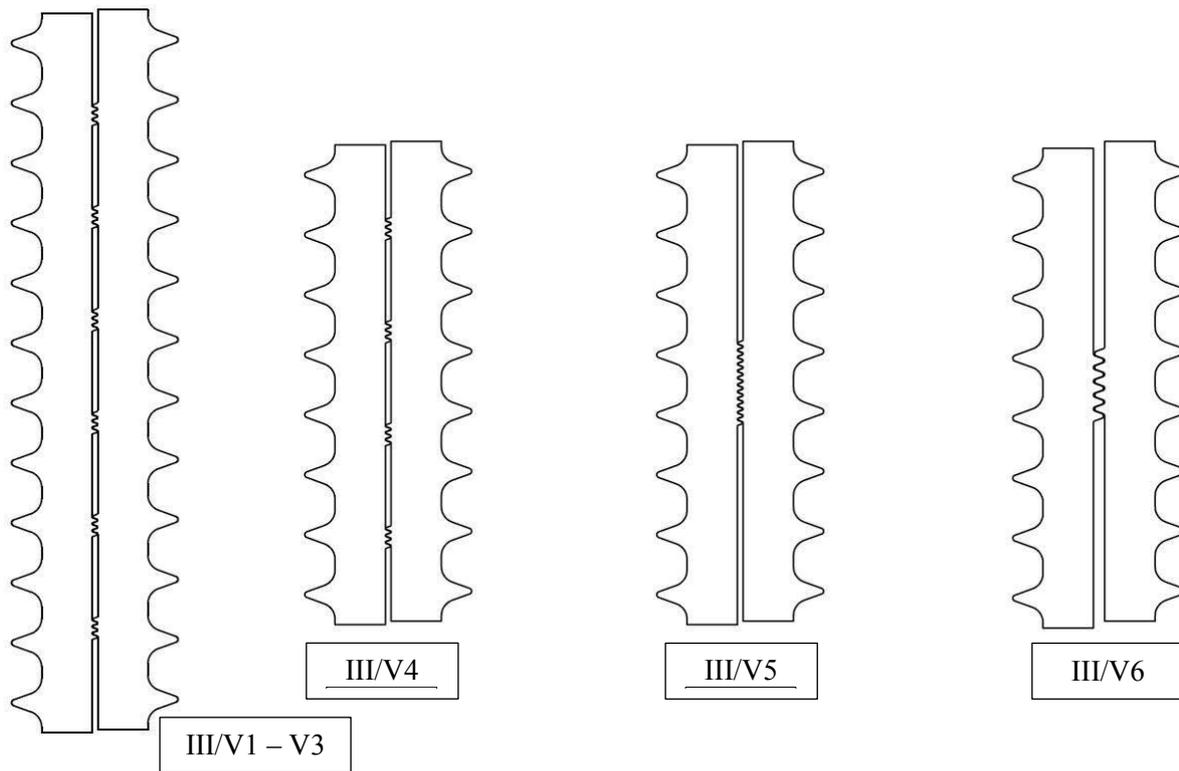


Abb. 6.2: Zahnleisten der Versuche an den Konsolen

Die untersuchten Konsolen sind nach den Verhältnis e/h_c als kurze Konsole einzuordnen. Dabei befinden sich die Konsolen III/V1-3 mit $e/h_c = 0,235$ an der unteren Grenze zur sehr kurzen Konsole und die Konsolen III/V4-6 mit $e/h_c = 0,485$ an der oberen Grenze zur schlanken Konsole.

6.1.4 Prüfmaschine und Messtechnik

Es wird ein Zwick Roell-Prüfrahmen mit 2,5 MN Hydraulikzylinder auf dem Aufspannfeld der TU Berlin (Peter-Behrens-Halle) genutzt. Die Versuche werden mit dem in Kapitel 3.8.2 beschriebenen computergesteuerten Messsystem aufgezeichnet. Die Wege werden während des Versuchs über induktive Wegaufnehmer aufgenommen. Hierbei werden jeweils auf der rechten und der linken Seite die vertikalen Wege unterhalb der Konsole, die horizontalen Wege der Konsole an der Konsolenvorderkante in Höhe der Gewindestangen (Gewi Konsole) und die horizontalen Wege der Stütze gemessen (Abb. 6.4). Bei den Konsolversuchen III/V1 bis III/V3 werden die IWA an der Stütze auf Höhe der Gewindestangen der Stütze angebracht. Bei den Konsolversuchen III/V4 bis III/V6 auf Höhe der Gewindestangen der Konsole platziert (Abb. 6.4). Durch die horizontale Messung an beiden Bauteilen kann die Wegdifferenz zwischen Konsole und Stütze bestimmt werden. Die Dehnungen in den Gewindestangen werden über Dehnmessstreifen 1-LY11-10/120 der Firma Tokyo Sokki Kenkyujo Co., Ltd gemessen und darüber die Spannungen bzw. die Kräfte in den Gewindestangen bestimmt. Dazu wird das Gewinde abgetragen und ein DMS aufgeklebt, sodass die Dehnungen möglichst mittig an der Gewindestange gemessen werden können (Abb. 6.3). Zusätzlich werden die Kräfte mithilfe von zwei Kraftmessdosen – eine je Gewindestange – der Firma HBM gemessen.



Abb. 6.3: DMS an den Gewindestangen

6.1.5 Versuchsaufbau

Der Versuchsaufbau besteht aus dem Widerlager, welches mit dem Aufspannfeld verspannt ist sowie den Prüfkörpern, Konsole und Stütze. Die Montage der Konsole an die Stütze erfolgt auf dem Widerlager, jedoch nicht in Endlage. Dabei wird die Stahlverzahnung der Konsole an die Stahlverzahnung der stehenden Stütze platziert und durch die Gewindestangen in der Lage gesichert. Die Stahleinbauteile werden vorher mit einem Überstand in die Stütze und Konsole eingebaut, sodass im zusammengebauten Zustand ein Spalt von 12,5 mm zwischen den Betonbauteilen vorhanden ist. Der Spalt dient der Einsicht der Zähne während des Versuchs. Außerdem werden dadurch undefinierbare Kontakte zwischen beiden Bauteilen vermieden. An der Oberseite der Konsole wird eine Stahlplatte in den Spalt eingelegt, sodass die Konsole beim Vorspannen nicht an die Stütze gezogen wird. Nachdem die Konsole vollständig an der Stütze montiert und entsprechend vorgespannt ist, werden beide Elemente am Widerlager in die Endposition gebracht, ausgerichtet und mit zwei Gewindestangen M36-10.9 an das Widerlager verschraubt. Sowohl die Gewindestangen beim Anschluss Konsole an Stütze als auch diese beim Anschluss Stütze an Widerlager werden mit 1200 Nm alternierend vorgespannt. Der hydraulische Prüfstempel wird mittig über der Konsole platziert. Die Prüflast wird über eine Auflagerplatte in die Konsole eingeleitet.

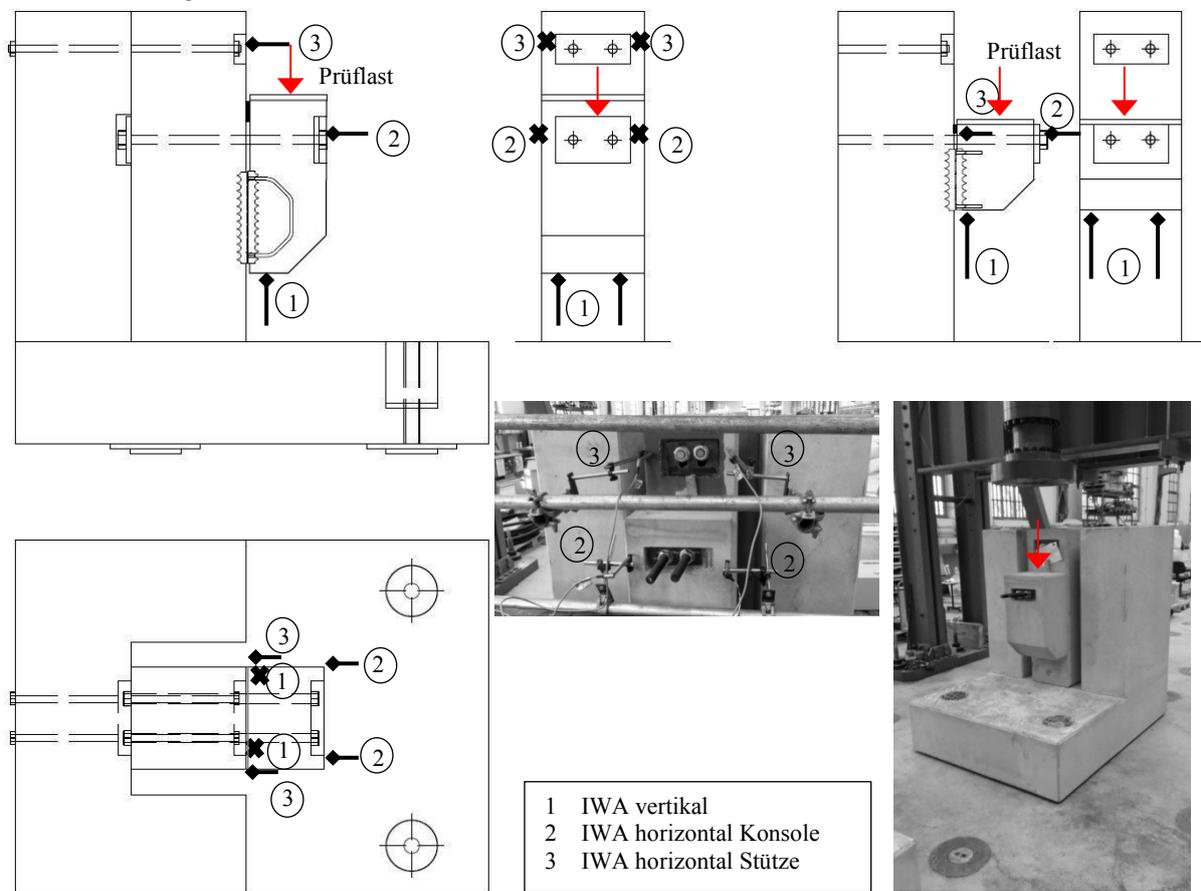


Abb. 6.4 Versuchsaufbau Phase III mit Lage der IWA

Die modulare Konsole funktioniert ähnlich wie die monolithische Konsole über die Ausbildung eines Druckknotens und einer Zugverankerung. Der Druckknoten wird durch die Stahleinbauteile und deren Stahlverzahnungen hergestellt. Die Zugverankerung wird durch die beiden Gewindestangen, welche die Kraft über Kopfplatten in die Konsole bzw. die Stützenhinterseite einleiten, erreicht. Da die Gewindestangen vorgespannt sind, wird unterhalb der Lasteinleitungsplatte eine Spannung erzeugt bzw. eine Kraft in den Beton eingeleitet. Diese wird durch die aus der vertikalen Konsollast resultierende Zugkraft in den Gewindestangen weiter erhöht. Daher greift am Druckknoten (Stahleinbauteil) die resultierende Kraft aus der vertikalen Konsollast und der Vorspannkraft addiert mit dem horizontalen Anteil der vertikalen Konsollast unter dem Winkel θ an (Abb. 6.5).

Um die Vorspannkraft möglichst genau einzuschätzen, wird diese bei den Versuchen III/V4 bis III/V6 mit Kraftmessdosen gemessen und durch Dehnungsmessungen an den Gewindestangen bestimmt. Zusätzlich wird bei allen Versuchen das aufgebrachte Drehmoment nach DIN EN 1993-1-8/NA (2010) sowie nach Muhs et al. (2014) in eine Kraft umgerechnet (vgl. Falter et al. (2018)).

Durch die Stahlplatte, die oberhalb der Gewindestangen in den Spalt zwischen Konsole und Stütze platziert wird, findet im überdrückten Zustand eine Kraftübertragung durch Reibung von der Konsole in die Stütze statt (Abb. 6.5). Diese Kraft wird nicht von der Stahlverzahnung des Druckknotens übertragen. Diese Kraft wird über die wirkende Horizontalkraft (Druck) und den Reibbeiwert zwischen Stahl und Beton ermittelt. Die Horizontalkraft wird aus der Vorspannkraft und den horizontalen Anteil aus der vertikalen Konsolkraft berechnet. Der Reibbeiwert $\mu=0,3$ wird über einen Reibversuch des eingelegten Stahls mit einem Betonpartner bestimmt. Dieser Reibbeiwert ist im unteren Bereich der in der Literatur beschriebenen Reibbeiwerte (Tab. 6.2)

Tab. 6.2: Reibungsversuche aus der Literatur

Literatur	Reibbeiwert μ	Reibpartner
Schneider (2016)	0,30 – 0,45	Beton/Stahl
FP Univ. Karlsruhe (1977)	0,20 – 0,40	Beton/Stahl
Juhart (2011)	0,70	UHPC/Stahl
Roik, Bürkner (1978)	0,75	Beton/Stahl ohne Schalöl
Roik, Bürkner (1978)	0,63	Beton/Stahl mit Schalöl
Eurocode 4	0,50	Beton/Stahl mit $10 \leq t_{\text{Stahl}} < 15$ mm:
Eurocode 4	0,55	Beton/Stahl mit >15 mm
DIN 18800-1	0,50	Beton/Stahl

6.1.6 Versuchsdurchführung

Die Prüflast wird in sieben Belastungs- und Entlastungsrampen auf die Konsole aufgebracht. Bei den Versuchen III/V1-3 wird jeweils eine Rampe auf 20kN und weiter auf 50 kN gefahren und danach auf 20 kN entlastet. Damit wird die Verzahnung in Kontakt gebracht und der Schlupf minimiert. Es folgen drei Zyklen bis 200 kN und dann nochmal drei Zyklen bis 300 kN. Danach wird der Prüfkörper bis zum Versagen belastet (Tab. 6.3). Das Lastregime wird bei den Versuchen III/V4-V6 gekürzt und nur einmal drei Lastzyklen gefahren.

Tab. 6.3: Laststufen Konsole in kN

Rampe		1	2	3	4	5	6	7	8	9
III/V1-V3	Belastung	20	50	200			300			F_u
	Entlastung	-	20	20			20			-
Rampe		1	2	3	4	5				
III/V4-V6	Belastung	20	150			F_u				
	Entlastung	-	20			-				

6.1.7 Versuchsbeobachtungen und Messergebnisse

Kräfte an der Konsole während des Versuchs:

Die Gewindestangen werden mit einem Drehmomentschlüssel alternierend vorgespannt (Tab. 6.5). Diese Vorspannkraft P ist als Zugkraft in den Gewindestangen und als Druckkraft im Betonquerschnitt der Konsole vorhanden. Um den Spalt zwischen Konsole und Stütze sicher zu stellen, ist oberhalb der Gewindestange eine Stahlplatte eingelegt. Die vorgespannte Gewindestange presst die Konsole sowohl an diese Stahlplatte als auch an die Stahlverzahnung des Druckknotens. Über eine Betrachtung als Einfeldträger mit außermittig angreifender Einzellast können die Kräfte berechnet werden, die aus der Vorspannung an der Stahlplatte (F_{D1}) und an der Verzahnung (F_{D2}) angreifen (Abb. 6.5) Durch die vertikale Prüflast F_V auf der Konsole, wird die Zugkraft in der Gewindestange sowie die Betondruckspannung in der Konsole erhöht. Ebenfalls erhöht wird die Kraft, welche an der Stahlverzahnung (Einbauteil) im unteren Druckknoten angreift. Die Kraft an der Stahlplatte oberhalb der Gewindestangen wird hingegen durch die Kraft F_V reduziert.

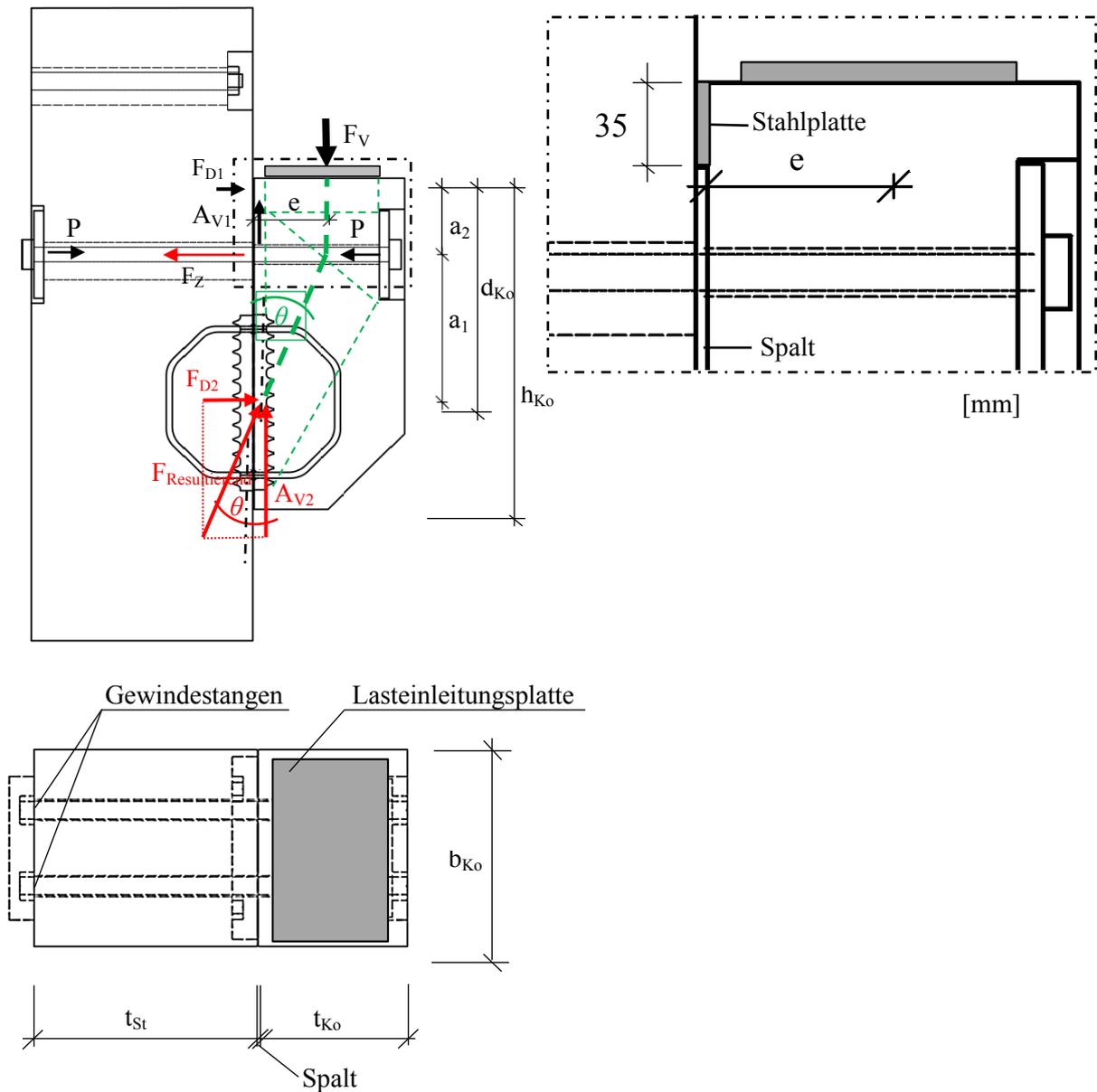


Abb. 6.5: Kräfte an der Konsole

Tab. 6.4 Berechnung der Kräfte an der Konsole

Zeitpunkt der Lastaufgabe	$F_V = 0$ u. $F_{ZGew.} = P$	$F_V < \frac{P \cdot a_1}{e}$	$F_V \geq \frac{P \cdot a_1}{e}$
F_{D1}	$\frac{P \cdot a_1}{a_1 + a_2}$	$\frac{P \cdot a_1 - F_V \cdot e}{a_1 + a_2}$	0
F_{D2}	$\frac{P \cdot a_2}{a_1 + a_2}$	$\frac{P \cdot a_2 + F_V \cdot e}{a_1 + a_2}$	$P + \frac{F_V \cdot e}{a_1}$
A_{V1}	0	$F_{D1} \cdot \mu$	0
A_{V2}	0	$F_V - A_{V1}$	F_V
$F_{ZGew.}$	P	$> \approx P$	$\frac{F_V \cdot e}{a_1}$

Hinweis: Alle Kräfte werden in der gezeigten Richtung als positiv wirkend angesetzt.

Beanspruchung der Gewindestangen während des Versuchs:

Bei den Versuchen III/V4-6 werden die Zugkräfte während des Versuchs mithilfe von Kraftmessdosen und Dehnmessstreifen bestimmt. Bei allen Versuchen III/V4 bis III/V6 steigt die Zugkraft in der Gewindestange mit zunehmender Prüflast mit geringer Steigung an (Abb. 6.6) bis die überdrückte (gestauchte) Fuge zwischen Beton und Stahlplatte lastfrei ist. Da die Hebelarme a_1 und e bei den Versuchen III/V4 bis III/V6 gleichgroß sind, ist die Vorspannkraft $P = 400$ kN bei einer Prüfkraft $F_V = 400$ kN aufgehoben. Die weitere Laststeigerung zeigt, dass die Kraft in den Gewindestangen ab $F_V = 400$ kN steiler ansteigt (III/V5 u. V6). Der Versuch III/V6 zeigt ab einer Prüfkraft $F_V = 500$ kN einen flacher werdenden Verlauf der Kraft in den Gewindestangen. Das wird mit sich touchierenden Zahnleisten unterhalb der konzentriert angeordneten Verzahnung begründet. Dadurch vergrößert sich der Hebelarm a_1 , wodurch eine Kraftreduzierung in der Gewindestange eintritt. Zu diesem Zeitpunkt weisen die Zähne bereits eine große Verformung auf. Die Aufzeichnung der Kraftmessdosen verlaufen parallel zum berechneten Verlauf der Dehnungsmessungen. Die Kräfte aus den Dehnungsmessungen sind mit einem E-Modul von 210.000N/mm^2 und einem Stahlspannungsquerschnitt von $5,61\text{mm}^2$ berechnet. Dabei sind die Kräfte aus den Dehnungsmessungen höher als die aus der KMD-Aufzeichnung. Bei geringfügig niedrigeren Stahlspannungsquerschnitt bzw. E-Modul würden beide Kraftverläufe direkt übereinander liegen. Demnach sind die aufgezeichneten Kraftverläufe plausibel und die aus dem Drehmoment berechneten Vorspannkräfte können besser eingeschätzt werden.

Tab. 6.5: Ermittlung der Vorspannkräfte, Versuchslasten und daraus resultierende Auflagerkomponenten

Versuchsnr.	Geometrie	Drehmoment M_A in Nm	Ermittlung der Vorspannkräfte in [kN] nach					Summe Angesetzte Vorspannkraft P [kN]
			Gemessen KMD Gewinde	Gemessen DMS [kN]	Interpoliert nach DIN EN 1993-1- 8/NA:2010	Muhs et al. 2007 Genau	Muhs et al. 2007 Vereinfacht	
III/V1	GT5	Handfest ~ 2x220	k.M.	-	2 x 46,7	2 x 45,7	2 x 43,1	80
III/V2	GT5	2x 300	k.M.	-	2 x 63,6	2 x 62,3	2 x 58,8	120
III/V3	GT5	2x 1200	k.M.	-	2 x 254,5	2 x 249,2	2 x 235,3	400
III/V4	GT5	2x 1200	2x 190	2x 222				
III/V5	GT5	2x 1200	2x 202	2x 234				
III/V6	GT3	2x 1200	2x 199	2x 216				

Versuchsnr.	Vertikale Versuchslast F_{VU} [kN]	F_{D1} [kN] (gerechnet)	F_{D2} [kN] (gerechnet)	A_{V1} [kN] (gerechnet)	A_{V2} [kN] (gerechnet)	$F_{Z,Gew.}$ [kN] (gerechnet)	$F_{Z,Gew. KMD}$ [kN] ¹⁾ (gemessen)	$F_{Z,Gew. DMS}$ [kN] (gemessen)	Kraftneigungswinkel θ	Resultierende Bruchlast aus F_{D2} u. A_{V2}	Bruchlast pro cm Zahn- länge q_{sz} [kN/cm]	Fugenöffnung am obersten Zahn [mm]	Konsolverdrehung [°]
III/V1	260,4	0	139	0	260	139	-	-	28	295	2,3	1,3	0,28
III/V2	375,4	0	200	0	375	200	-	-	28	426	3,3	1,1	0,24
III/V3	493,5	103	298	31	463	400	-	-	33	550	4,4	0,1	0,01
III/V4	471	0	502	0	471	502	450	500	47	689	8,2	0,0	0,0
III/V5	521	0	556	0	521	556	560	690	47	762	9,1	0,1	0,13
III/V6	705	0	752	0	705	752	720	900	47	1031	29,5	1,4	2,8

¹⁾Werte als gemittelten Wert aus Diagramm abgelesen

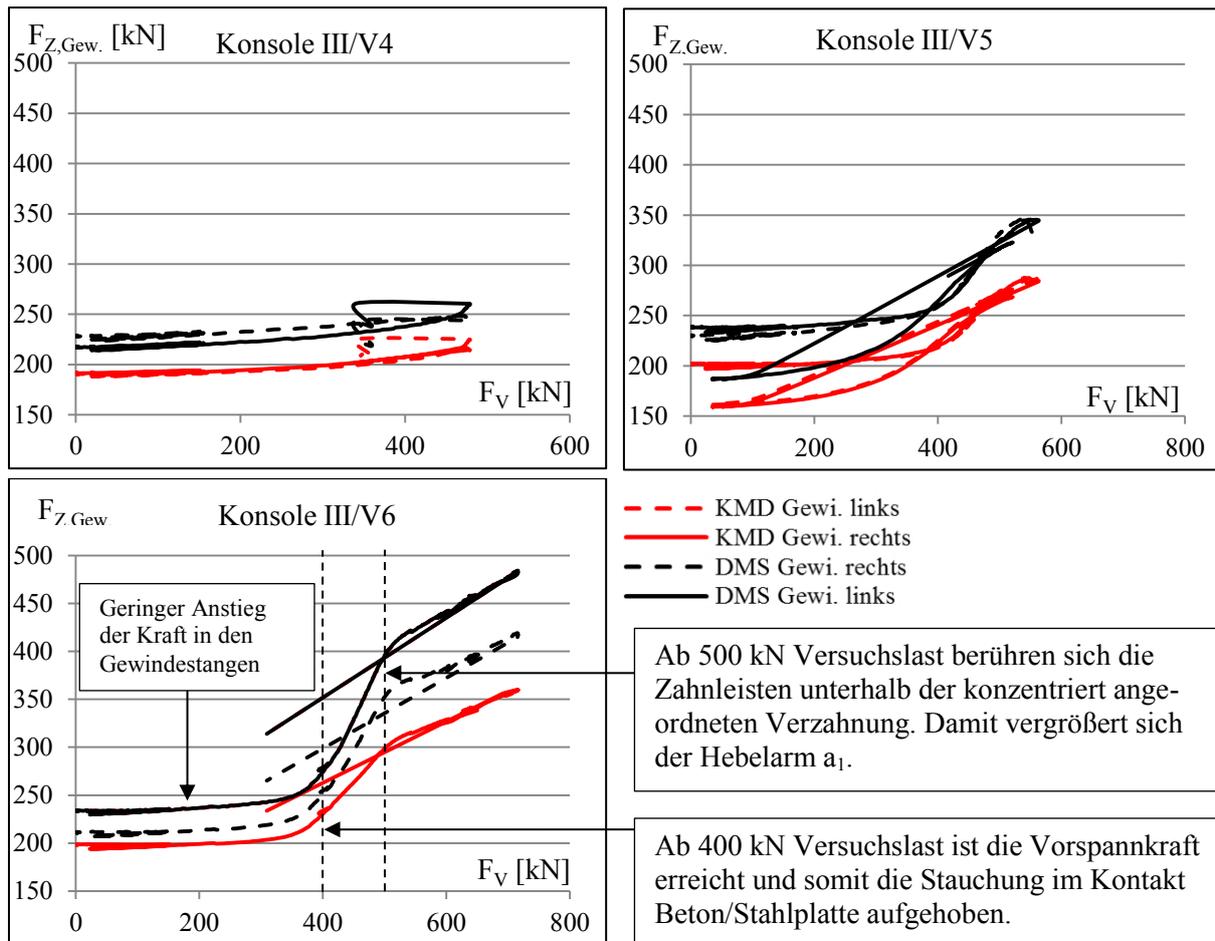


Abb. 6.6: Verlauf der Zugkräfte in den Gewindestangen an der Kraftmessdose und den Dehnmessstreifen in Abhängigkeit der Versuchslast, Konsolversuche 4, 5 und 6

Einfluss der Vorspannung:

Die Versuche III/ V1 bis III/V3 werden mit unterschiedlichem Drehmoment vorgespannt. Während der Konsolversuche III/V1 nur handfest mit einem Drehmoment von etwa 220 Nm vorgespannt wird, beträgt das aufgebrachte Drehmoment beim Versuch III/V2 300 Nm je Gewindestange und der Konsolversuch III/V3 1200 Nm je Gewindestange. Konsole III/V1 macht sehr große Verformungen in vertikaler als auch horizontaler Richtung und erreicht die geringste Prüflast von 260,4 kN (Abb. 6.7). Konsole III/V2 hat einen ausgeprägten Schlupfbereich. Die Zähne kommen mit zunehmender Last in Kontakt bis eine vollständige Kraftübertragung erfolgt und kein Schlupf mehr vorhanden ist. Ab der vollständigen Kraftübertragung ist die Steigung des Tangentenmoduls der Last-/Verformungskurve steiler als zuvor. Die Prüflast beträgt hier 375,4 kN und liegt somit zwischen den Versuchen III/V1 und III/V3. Das gilt auch für die Verformungen, wenn der Anfangsschlupf beim Versuch III/V2 herausgerechnet wird. Der Versuch III/V3 kann die größte Prüfkraft (493,5kN) bei geringster Verformung übertragen. Die Tragfähigkeit der Konsole ist von der Passgenauigkeit der feinen Stahlzähne abhängig. Dabei ist es wichtig, dass die Vorspannung die Verzahnung in der Lage sichert. Je höher die Vorspannkraft ist, desto länger kann die Verzahnung in der Lage gesichert werden.

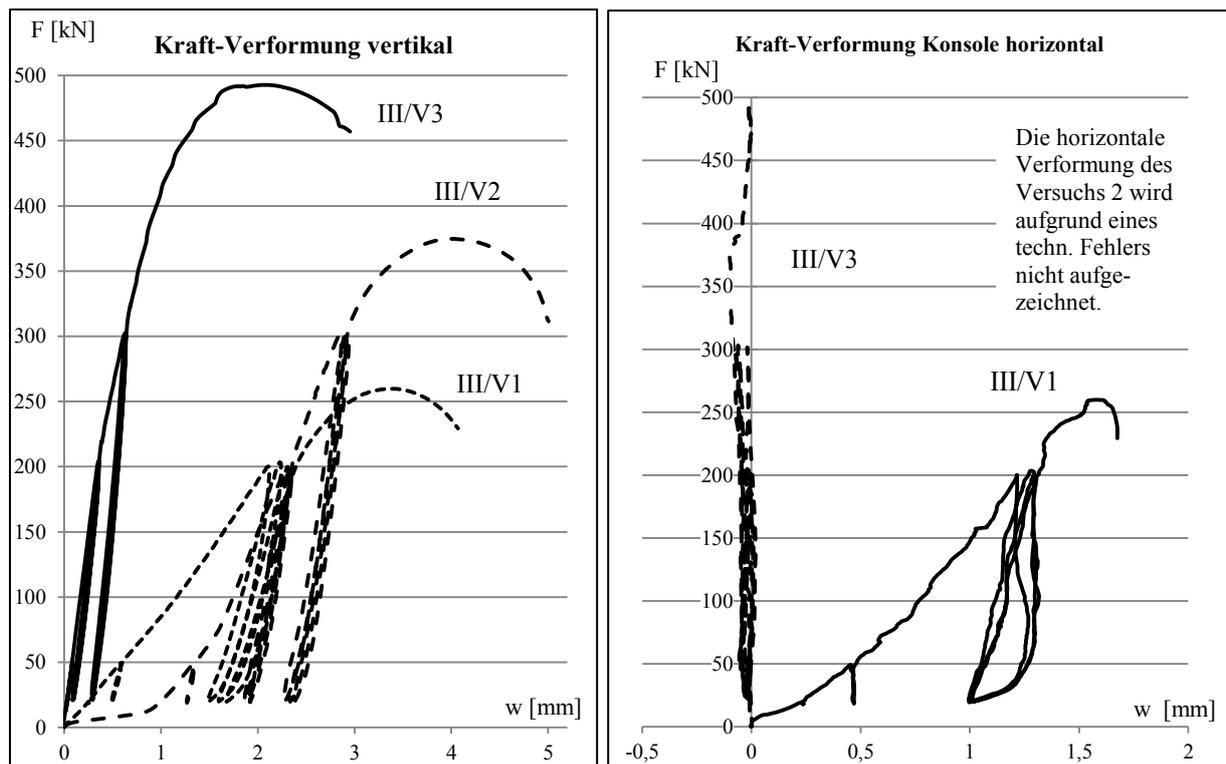


Abb. 6.7: Kraft-Verformungsverlauf vertikal (links) und horizontal (rechts) für Konsole V1, V2 und V3

Einfluss der Konsolenhöhe:

Bei den Versuchen an der Konsole III/V1 bis III/V3 wird eine Konsolenhöhe von 68 cm ($d=30$ cm) und bei den Versuchen III/V4 bis III/V6 von 33 cm ($d=15$ cm) verwendet. Die Konsolenhöhe hat auch Auswirkungen auf den inneren Hebelarm d zwischen der Zugkraft in der Gewindestange und der Druckkraft im Druckpunkt der feinen Stahlverzahnung. Damit hat die Konsolenhöhe auch direkten Einfluss auf den Kraftneigungswinkel, unter welchem die Kraft auf die feine Stahlverzahnung trifft und damit auf die Tragfähigkeit der Verbindung (Abb. 6.5). Die relativ große Höhe von 68 cm zeigt einen relativ flachen Kraftneigungswinkel von etwa $\theta = 28^\circ$ bei Konsolversuch III/V1 und III/V2 und etwa $\theta = 33^\circ$ bei Konsolversuche III/V3. Die mit 33 cm Höhe deutlich kleineren Konsolen III/V4 bis III/V6 weisen Kraftneigungswinkel von etwa $\theta = 47^\circ$ auf. Während die Konsole III/V3 mit 36 Zähnen eine Prüflast von 493,5kN aufnehmen kann, beträgt die Prüflast beim Versuch III/V4 mit 24 Zähnen 470kN. Eine kleinere Konsolenhöhe führt einerseits zu erhöhten Horizontallasten im Druckknoten und wirken somit günstig, andererseits vergrößert diese auch die Zugkraft in den Gewindestangen. Das wirkt ungünstig auf die Verbindung.

Einfluss der Zahnanzahl über die Leiste:

Bei den Konsolversuchen III/V4 und III/V5 wird der Einfluss der Zahnanzahl über die Leiste untersucht. Bei V4 war die Verzahnung GT 5 in vier Gruppen zu je drei Zähnen entlang der Leiste angeordnet. Bei III/V5 wird die gleiche Anzahl von insgesamt 24 Zähnen mittig an der Leiste konzentriert angeordnet. Die Konsole III/V5 zeigt eine größere Rotation. Mit zunehmender Prüflast stellt sich ein Riss ein, welcher vom Schnittpunkt der beiden Lasteinleitungslinien (Prüflast und Vorspannung) unter $\theta \approx 45^\circ$ mittig in die Zahnleiste und somit ins Zentrum der feinen Stahlverzahnung verläuft (Abb. 6.17). Dieser Riss entsteht aus Querkraft in diesem Bereich. In V4 wird die Kraft an der Zahnleiste über eine größere Höhe übertragen, was zu keiner so ausgeprägten Spannungskonzentration führt. Die Konsole kann sich nicht so effektiv drehen, da der Drehpunkt in der unteren Zahngruppe liegt und sich somit an der oberen Zahngruppe ein Spalt öffnet. Aufgrund des Spaltes wird die Kraftübertragung in den oberen Zahngruppen reduziert bzw. aufgehoben. Die Versuche zeigen eine größere Tragfähigkeit bei konzentrierter Zahnanzahl (Abb. 6.8). Die betonseitige Verzahnung erfährt bei der konzentrierten Stahlzahnanzahl auch Lastkonzentrationen, zeigt jedoch keine Schädigungen.

Einfluss der Druckstrebenneigung bei modularen Konsolen:

Für monolithische Konsolen gilt: je näher am Auflager die Lasten eingeleitet werden, desto besser kann die Konsole diese Lasten abtragen. Die Lasten gehen direkt in die Stütze. Für modulare Konsolen gilt dies nicht analog, da die Verbindungslinie zwischen Verzahnung und Lasteinleitungsplatte die Neigung der Druckdiagonalen bestimmt. Die Tragfähigkeit der Verzahnung nimmt bei kleinen Winkeln zwischen Krafrichtung und Verzahnung ab. Kleine Kraftneigungswinkel führen zu einem Abscherversagen der feinen Stahlzähne.

Messergebnisse:

Die übertragbare Kraft kann bei der Zahngeometrie GT5 für einen Kraftneigungswinkel θ von etwa 28° je Zentimeter Einzelzahnlänge mit etwa $q_{sz}=2,8$ kN/cm angegeben werden, bei θ von etwa 33° sind es etwa 4,4 kN/cm, bei θ von etwa 47° sind es etwa 8,7 kN/cm. Der Versuch III/V6 mit der Zahngeometrie GT3 mit den großen Zähnen zeigt bei einem Kraftneigungswinkel θ von etwa 47° eine Kraftübertragung von etwa 29,5kN/cm.

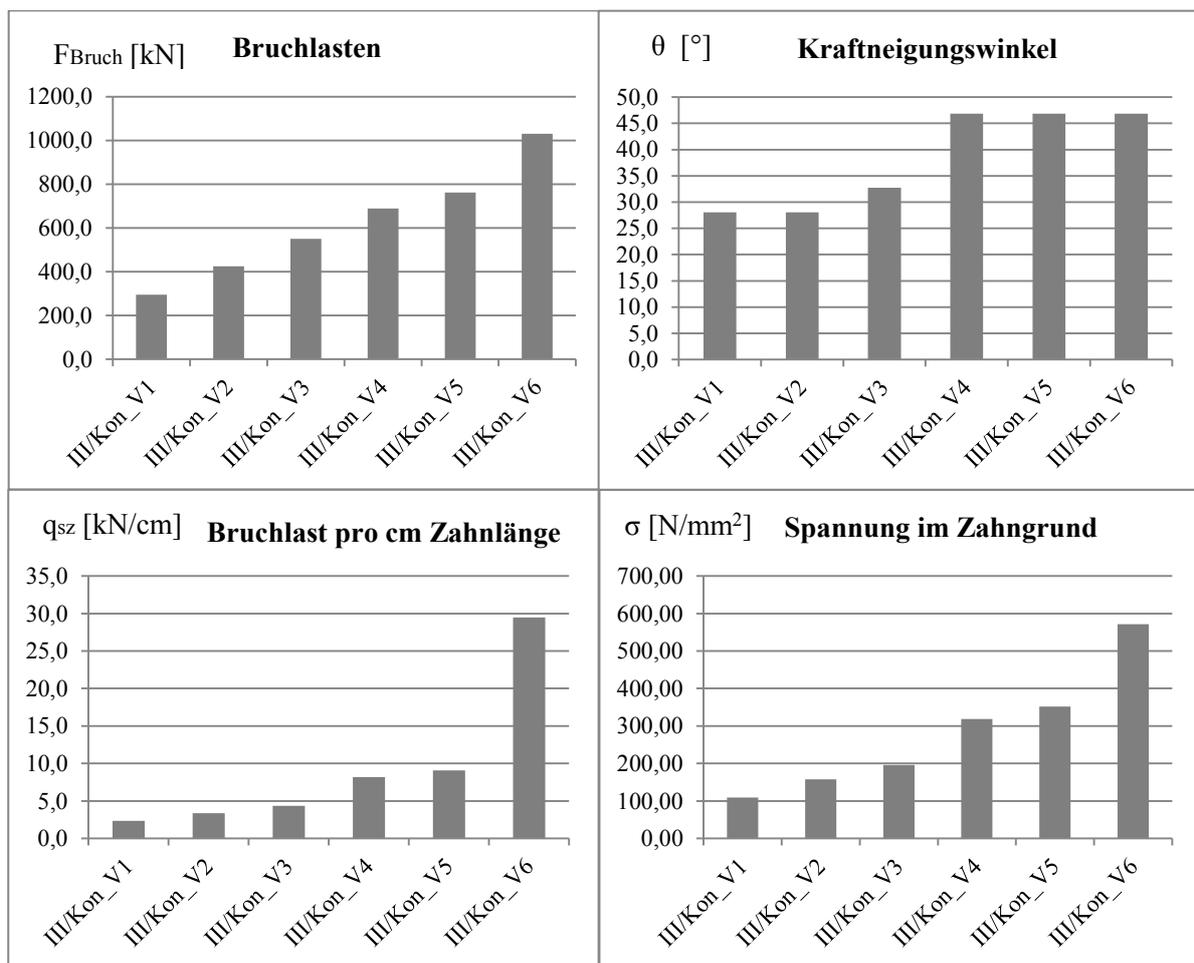


Abb. 6.8: Darstellung der Versuchsergebnisse zu den Konsolversuchen III/V1 bis III/V6

6.2 Simulation der Konsole

6.2.1 Simulationsmodell

Die Versuche am Knotenpunkt werden mit dem Computerprogramm Ansys simuliert. Die Konsole und die Stütze werden in einem dreidimensionalen Modell abgebildet und mit der Finite-Element-Methode berechnet (Abb. 6.9). Die Berechnung erfolgt dabei geometrisch nichtlinear sowie physikalisch nichtlinear. Es werden die Werkstoffmodelle aus Kapitel 3.5 und 4.2 sowie die Simulation Grundlagen aus Kapitel 3.6 angewendet. Das Simulationsmodell wird als Halbmodell abgebildet und gerechnet. Dabei wird eine Symmetrieachse definiert und in der Berechnung das Verhalten des Gesamtmodells berücksichtigt. Durch die Teilung des Systems in der Symmetrieachse (x-y-Ebene) wer-

den für die Berechnung nur die Hälfte der Knoten und entsprechenden Elemente benötigt. Dies vereinfacht die Berechnung und verkürzt die Berechnungszeit.

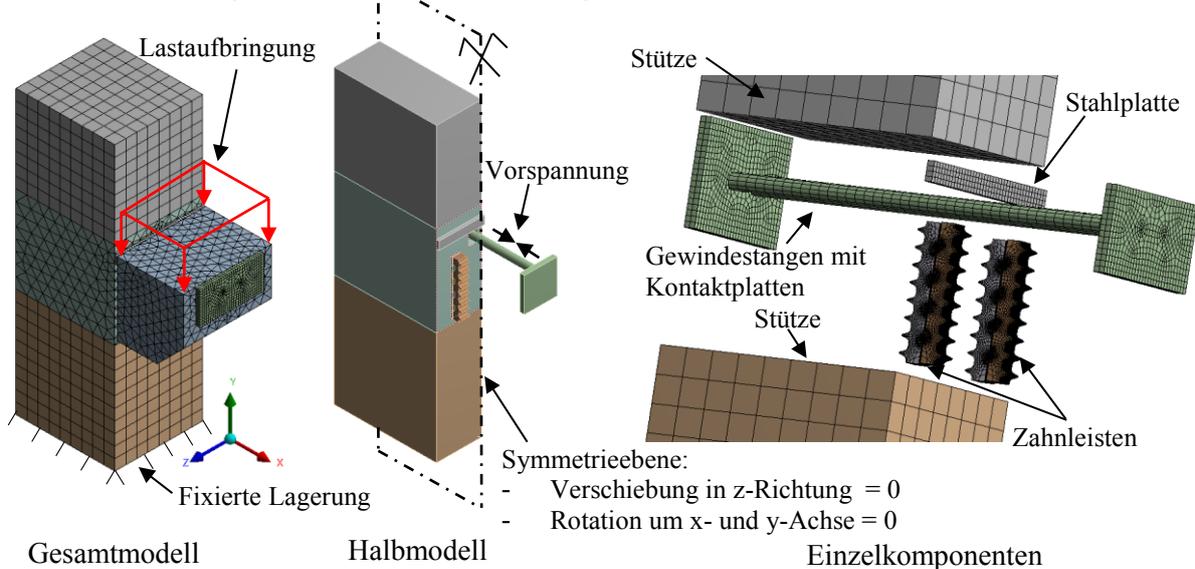


Abb. 6.9: Simulationsmodell (links u. mitte); Einzelkomponenten des Modells (rechts) (Mittlerer Stützenbereich und Konsole sind zur besseren Übersicht ausgeblendet)

Lagerung:

Die Stütze wird am Fußpunkt eingespannt gelagert (Fixierte Lagerung). Da die Relativverschiebung zwischen Stütze und Konsole maßgebend ist, ist diese Vereinfachung ausreichend.

Vorspannung:

Wie im Versuch, so werden auch im Modell zwei Gewindestangen M30-10.9 verwendet, um die Zugverankerung der Konsole an die Stütze herzustellen. An die Enden der beiden Gewindestangen werden zwei Stahlplatten modelliert und darüber die Kräfte in den Beton eingeleitet. Die Verbindung zwischen den Gewindestangen und den Lasteinleitungsplatten wird über einen Verbund (Knoten halten 6 Freiheitsgrade fest) modelliert. Die Gewindestangen werden mit einer Vorspannung P (Tab. 6.4) vorgespannt. Aufgrund der Interaktion mit der Konsollast erhöhen sich die Zugkräfte in der Gewindestange mit zunehmender Versuchslast. Diese sowie die damit verbundene Lasterhöhung auf den Betonquerschnitt werden im Modell berücksichtigt.

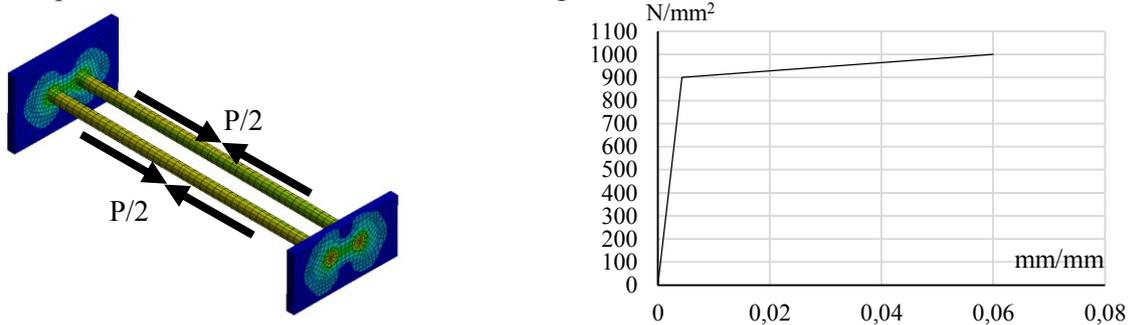


Abb. 6.10: Vorspannung mit Lasteinleitungsplatten und Materialmodell des Spannstaht

Die Materialformulierung der Gewindestange wird mit einem bilinearen Materialmodell in Anlehnung an einen gehärteten Stahl S355 abgebildet (vgl. Gabriel 1980).

Belastung:

Es wird eine konstante Flächenlast auf der Oberseite der Konsole aufgebracht. Die Lastaufbringung erfolgt in mehreren Lastschritten. Die Anzahl der Lastschritte richtet sich dabei nach der aufzubringenden Kraft.

Kontakte:

Die Berührflächen der einzelnen Bauteile zueinander werden als Kontakte mit Kontaktbedingungen definiert. Diese können Druckkräfte und Reibkräfte übertragen.

Tab. 6.5: Kontaktbedingungen zur Simulation der Konsole

Bauteile	Kontakt	Reibbeiwert	Kontakt	Reibbeiwert
Lastplatte der Vorspannung mit Betonquerschnitt Stütze bzw. Konsole	Reibungsbehaftet	0,35	Verbunden	-
Konsole an Stahlplatte	Reibungsbehaftet	0,35	Reibungsbehaftet	0,35
Metallplatte an Stütze	Verbunden	-	Verbunden	-
Zahnleiste an Beton	Reibungsbehaftet	0,35	Verbunden	-
Zahnleisten an Zahnleiste	Reibungsbehaftet	0,2	Reibungsbehaftet	0,2

6.2.2 Simulationsergebnisse

Globales Last-/Verformungsverhalten

Die vertikalen Verformungen der Versuche III/V1 bis III/V3 werden frühzeitig relativ groß (Abb. 6.11). Demnach plastiziert die feine Stahlverzahnung aufgrund des geringen Kraftneigungswinkel θ bei Prüflasten von 260,4kN (III/V1, $\theta \approx 25^\circ$) bis 493,5kN (III/V3, $\theta \approx 32^\circ$). Nachdem keine weitere Laststeigerung möglich ist, werden die Verformungen größer und der obere Prüfkörper gleitet über den unteren Prüfkörper (abrutschen). Begünstigt wird die Verformungszunahme durch das schnellere Abrutschen infolge des geringen Winkels θ . In der FE-Rechnung verläuft die Kraft/Verformungskurve länger im elastischen Bereich. Mit dem FE-Modell kann der linear-elastische Bereich gut abgebildet werden. Der plastische Bereich wird im FE-Modell jedoch nicht erfasst. Das liegt auch daran, dass die Verzahnung langsam übereinander gleitet und daher ein Abrutschen eintritt. Das kann in der numerischen Analyse aufgrund des instabilen Rechenlaufs nicht abgebildet werden.

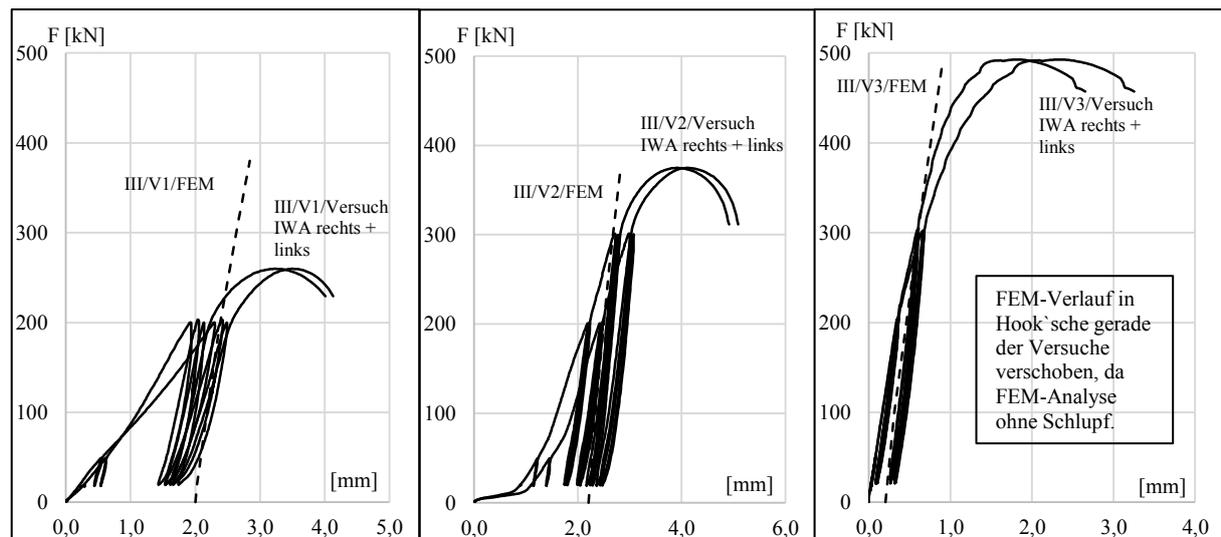


Abb. 6.11: Last/Verformungskurve III/V1 bis III/V3 aus Ansysrechnung

Bei den Versuchen III/V4 bis III/V6 wird ein steiferes Verhalten im Verbindungsbereich erreicht. Durch die geringere Konsolenhöhe wird eine gedrungenere Geometrie erreicht und dadurch der Kraftneigungswinkel steiler. Dieser verläuft unter etwa 45° . In der FE-Rechnung kann auch bei den Versuchen III/V4 bis III/V6 der linear-elastische Bereich gut abgebildet werden (Abb. 6.12). Ferner ist es möglich, den Anfangsbereich des plastischen Verlaufs nachzufahren.

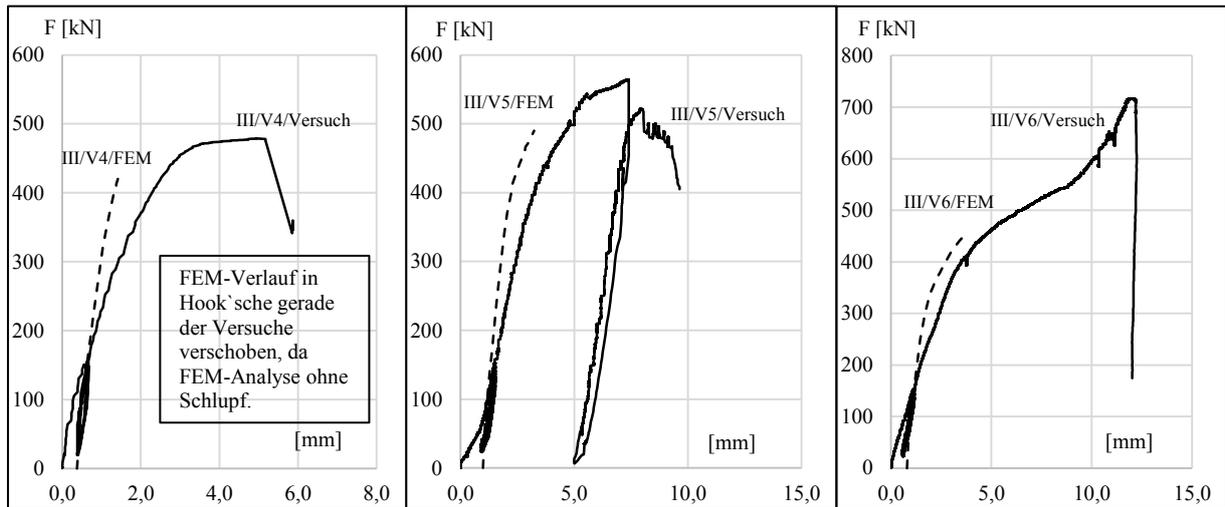


Abb. 6.12: Last/Verformungskurve III/V4 bis III/V6, Vergleich aus Versuch mit FE-Rechnung (Ansys)

Kraftfluss im Prüfkörper

Die feinen Stahlzähne der vier Zahngruppen im Versuch III/V4 zeigen ein ähnliches Spannungsbild, obwohl die Zahngruppen einen unterschiedlichen Abstand zum Lastangriff der Konsole haben und auch der Lastangriff geringfügig variiert. Der Einfluss der Zahnordnung über die Leiste kann auch in der FE-Rechnung gezeigt werden. Die FE-Rechnung zeigt im Versuch III/V4 eine gleichmäßigere Spannungsverteilung über die Zahnleiste als bei den Versuchen III/V5 und III/V6, da jede Zahngruppe nahezu gleichmäßig belastet wird (Abb. 6.13). Dadurch können auch alle betonseitigen Stahlzähne aktiviert werden. Das führt sowohl in der Stahlzahnleiste als auch im angrenzenden Beton zu einer Reduzierung der Spannungen. Die Zahnleisten der Versuche III/V5 und III/V6 zeigen die Spannkonzentration im Bereich der konzentriert angeordneten feinen Stahlzähne. Hier wird nur der Teilbereich der betonseitigen großen Stahlzähne aktiviert, welcher der einwirkenden Last zugewandt ist. Die drei unteren betonseitigen großen Zähne erhalten keine bzw. nur geringfügige Lasten. Demzufolge treten im belasteten Bereich der Stahlzahnleiste und im angrenzenden Beton höhere Spannungen auf. Bei allen drei Versuchen tritt ein symmetrisches Spannungsbild auf.

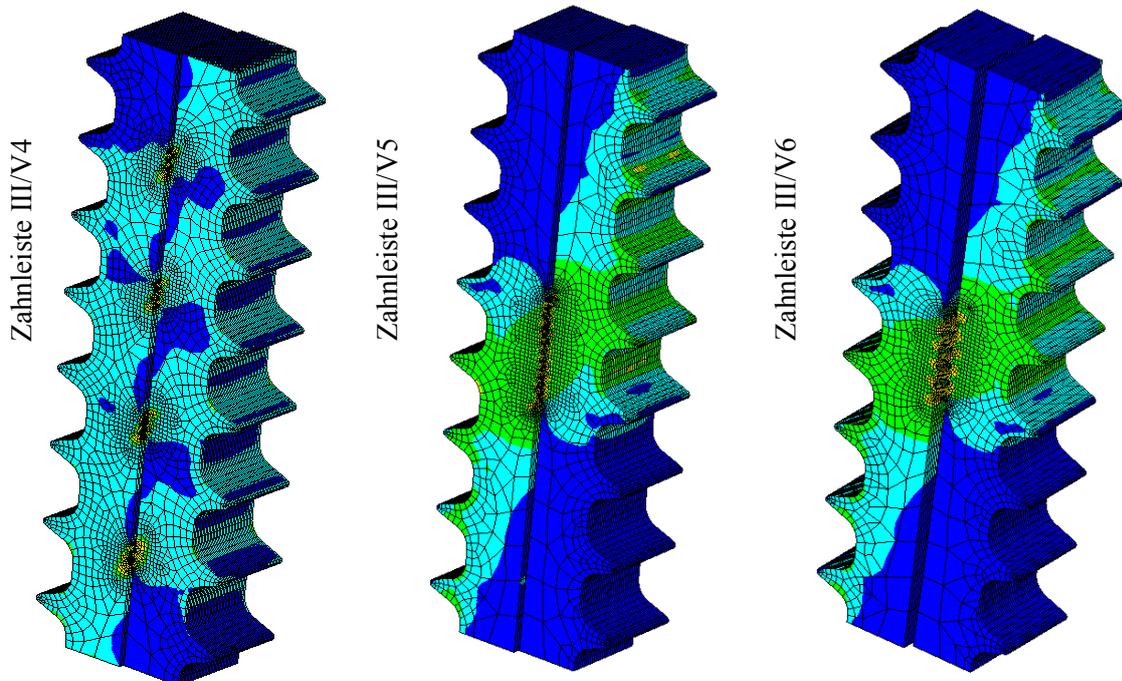


Abb. 6.13: Verlauf der Vergleichsspannungen in der Zahnleiste

Mit der FE-Rechnung kann auch das lokale Verhalten der feinen Stahlverzahnung gut nachvollzogen werden (Abb. 6.14 u. 6.15). Es wird eine Zahngruppe im Versuch bei etwa 50kN, 300kN und 470kN

fotografiert und diese Bilder jenen aus der FE-Rechnung gegenübergestellt. Diese Zahngruppe nimmt einen Lastanteil $F_{i,Result}$ der resultierenden Gesamtkraft F_{Result} am Druckknoten auf. Mit zunehmender Last verformen sich die Zähne merklich. Die im Versuch etwas größeren Verformungen sind mit den Herstelltoleranzen und dem damit verbundenen geringfügig kleineren Stahlquerschnitt des Zahnes zu begründen. An dieser Stelle zeigt sich auch, warum die Arbeitslinie der FE-Rechnung steiler verläuft, bzw. keinen ausgeprägten horizontalen Bereich ausbildet. Zusätzlich zu den Informationen zur Verformung ist qualitativ die Spannungsentwicklung in den Zähnen in Abhängigkeit der Prüflast ersichtlich.

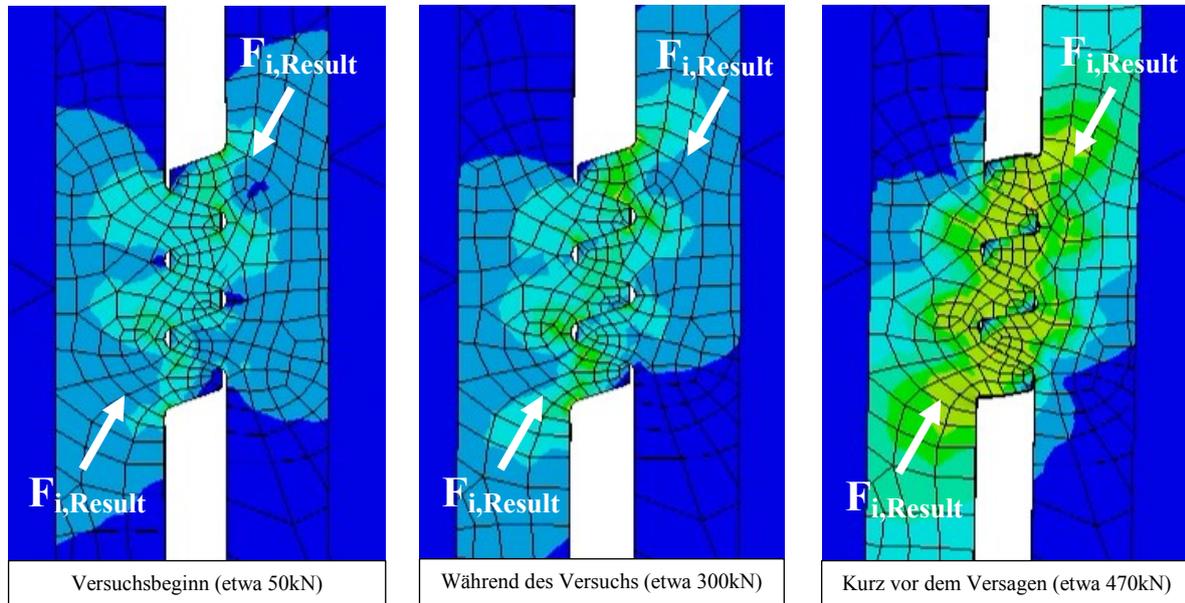


Abb. 6.14: Verformte Zähne im FE-Modell III/V4

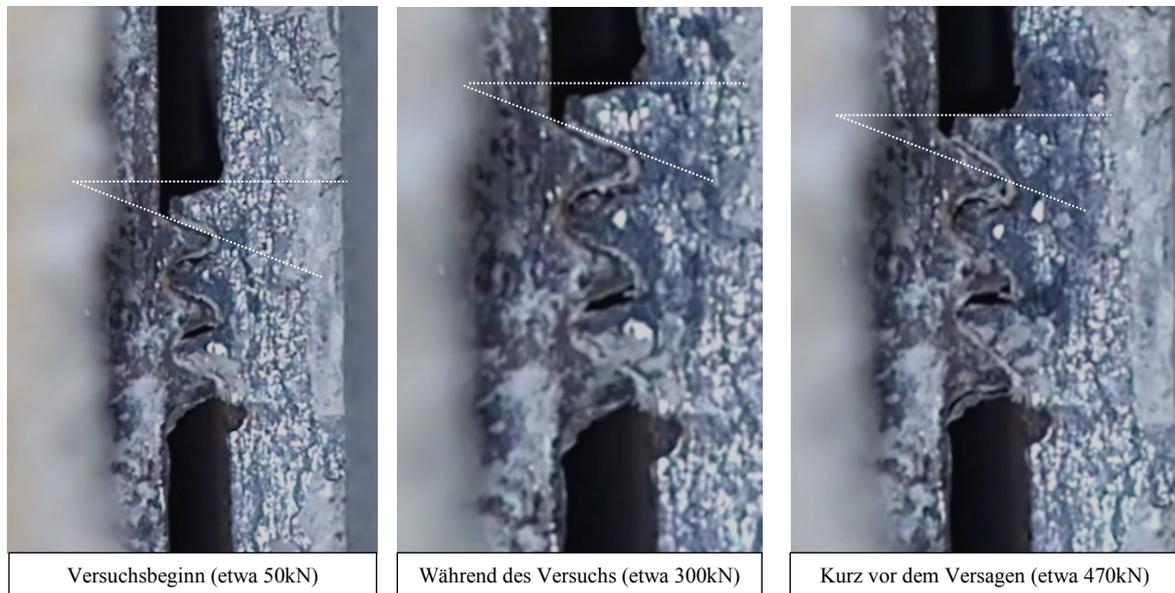


Abb. 6.15: Verformte Zähne im Versuch III/V4

Verhalten des Betons

Der hochfeste bzw. ultrahochfeste Beton zeigt in den Versuchen III/V1 bis III/V4 keine Schädigungen. Durch die in Zahngruppen über die Zahnleiste verteilt angeordneten Stahlzähne kann sich die Kraft auf eine größere Fläche verteilen. Damit bleiben die Spannungen im Beton gering. In der FE-Rechnung werden die geringen Betonspannungen bestätigt. Ebenso ist der Verlauf der Spannungsvektoren plausibel. Die Spannungsvektoren der FE-Rechnung zeigen den Kraftfluss zur bzw. in der Zahnleiste (Abb. 6.16). Bei den Versuchskörpern III/V5 und III/V6 wird die gesamte Kraft über die kom-

pakt angeordneten Stahlzähne übertragen, wodurch nahezu ausschließlich die der Last zugewandten betonseitigen Stahlzähne aktiviert werden (Abb. 6.16 links).

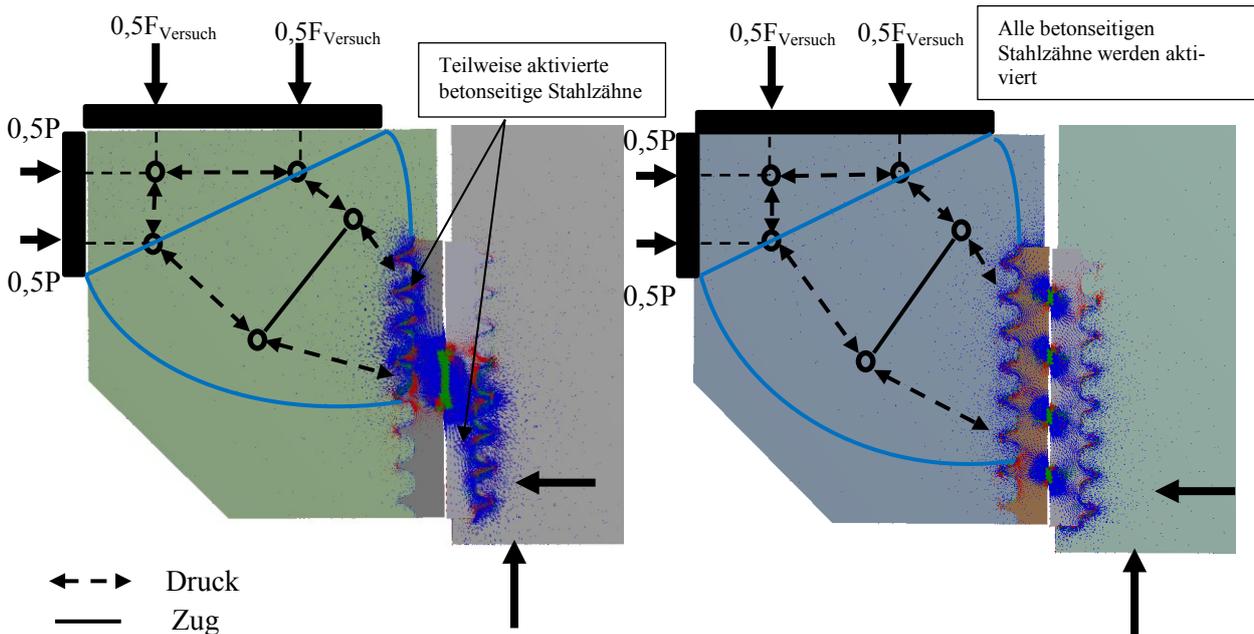


Abb. 6.16: Spannungsvektoren III/V6 (links) und III/V4 (rechts) aus einem Schnitt mittig durch die Zahnleiste des 3D-Modell mit eingezeichnetem Stabwerkmodell

Im Versuch III/V5 und III/V6 kommt es zu einem flaschenförmigen Verlauf der Spannungen, da diese im konzentrierten Druckpunkt zusammenlaufen. Das führt zu erhöhten Querspannungen in der Konsole. Bei beiden Versuchen bildet sich in der Konsole ein Riss. Dieser verläuft direkt ins Zentrum der feinen Stahlverzahnung.

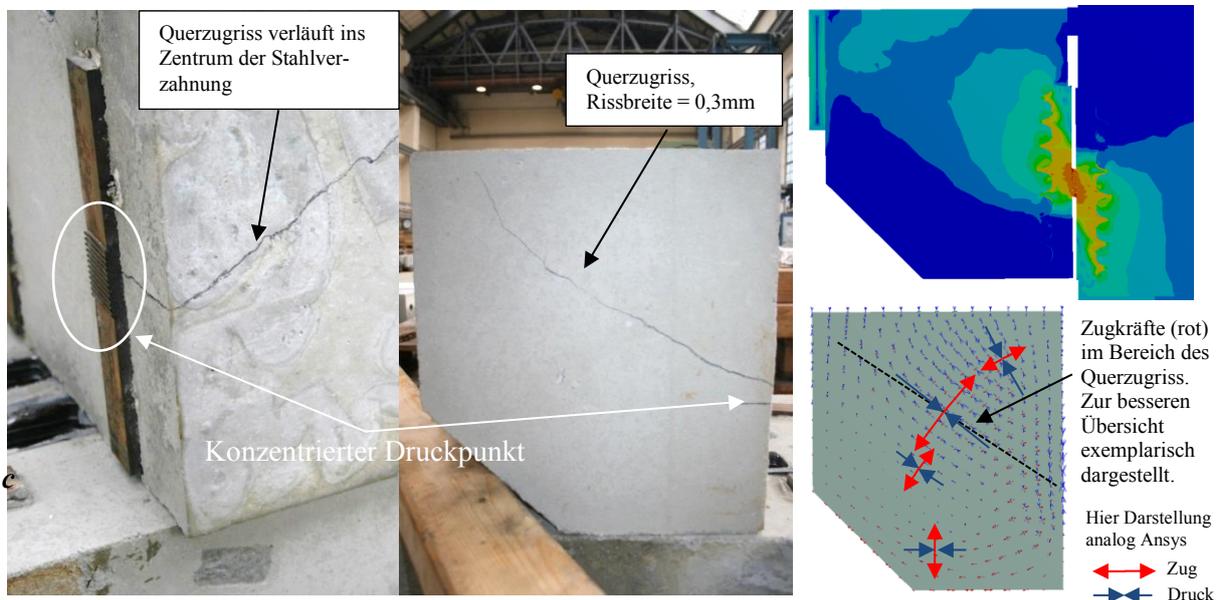


Abb. 6.17: Querzugriss bei kompakt angeordneter Stahlverzahnung III/V5 (links u. mitte), Vergleichsspannungen und Hauptspannungsvektoren (rechts)

Einfluss der Vorspannung

Analog zu den Versuchen zeigt auch eine Parameteruntersuchung anhand einer FE-Rechnung den Einfluss der Vorspannung auf das Trag- und Verformungsverhalten (Abb. 6.18). Dabei werden zwei Gewindestangen mit je 140kN, 200kN, 400kN und 600kN belastet. Je höher die Vorspannkraft, desto geringer sind die vertikalen Verformungen. Ebenso sind die horizontalen Verformungen geringer, je

höher die Vorspannkraft ist. Die vertikalen Verformungen werden an der Unterseite der Konsole, die horizontalen an der Vorderseite der Konsole sowie der Stütze gemessen (Abb. 6.4).

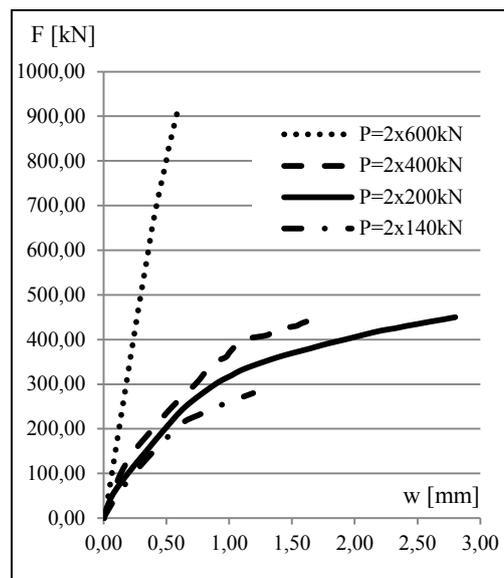


Abb. 6.18: Kraft-Verformungslinien (vertikal) in Abhängigkeit der Vorspannkraft

6.3 Zusammenfassung der Versuche und Simulationen zur Konsole

Das entwickelte Stahleinbauteil, bestehend aus den Zahnleisten aus Stahl und einer Verankerung im Beton durch einen Bewehrungsbügel oder Kopfbolzen, wird für den Anwendungsfall einer Konsole im Maßstab 1 zu 1 untersucht. Es wird ein asymmetrischer Versuchsaufbau verwendet. Damit ist es möglich, den Anschluss einer Konsole an eine Stütze ohne den Einfluss einer weiteren Konsole zu untersuchen. Damit der Einfluss, insbesondere hinsichtlich der Verformungen, aus der Hilfskonstruktion, möglichst gering ist, wird ein massives Stahlbetonwiderlager verwendet. Dieses wird im Hallenboden der Peter Behrens Halle der TU Berlin verspannt. Insgesamt werden sechs Versuche durchgeführt. In den ersten drei Versuchen werden Konsolen mit einer Höhe von 68cm mit unterschiedlicher Vorspannkraft an der Stütze befestigt. Dafür werden zwei Gewindestangen M30-10.9 verwendet. Die Tragfähigkeit der Konsole ist von der Passgenauigkeit der feinen Stahlzähne abhängig. Dabei ist es wichtig, dass die Vorspannung die Verzahnung in der Lage sichert. Je höher die Vorspannkraft ist, desto länger kann die Verzahnung in der Lage gesichert werden. Die feinen Stahlzähne werden in Zahngruppen (6x3 Zähne) angeordnet, um die Kräfte in der Zahnleiste und den angrenzenden Beton möglichst konstant zu halten.

Die Konsolhöhe der Versuche III/V4 bis V6 beträgt 33cm. In Versuch III/V4 werden die Zahngruppen beibehalten, jedoch bedingt durch die geringere Konsolenhöhe auf 4x3 Zahngruppen begrenzt. Dieser Versuch zeigt den Einfluss der Konsolhöhe bzw. des Verhältnis a_w/h_c auf. Bei der Konsole mit kleinerer Höhe h_c greift die Kraft unter einem steileren Winkel θ an. Dieser beträgt bei den betrachteten Versuchen etwa 47° . Die Verzahnung im Druckknoten kann dadurch größere Kräfte übertragen. Es wird jedoch angemerkt, dass dadurch die Zugkraft in den Gewindestangen entsprechend ansteigt und berücksichtigt werden muss. Der Versuch III/V5 hat die gleiche Anzahl an Zähnen wie der Versuch III/V4, jedoch sind die Zähne nicht in Zahngruppen, sondern im Schwerpunkt der Zahnleiste komprimiert angeordnet. Dadurch wird der Kraftfluss in der Zahnleiste komprimiert, es kommt zu höheren Spannungen. Gleichzeitig sichert die andrückende und somit haltende Kraftkomponente im Schwerpunkt der Verzahnung die Lage der Stahlzähne. Durch Verdrehungen der Konsole infolge der Prüflast können aufgrund der Zahnanordnung alle Zähne in Kontakt bleiben und unter dem Winkel θ belastet werden. Die Zahnleisten der Versuche III/V1-V5 haben die Zahngeometrie GT5. Im Versuch III/V6 wird die Zahngeometrie GT3 verwendet. Somit besteht ein Vergleich zu einer größeren Verzahnung. Die größere Verzahnung kann trotz der geringeren Anzahl von 10 Zähnen eine Prüflast von 705kN aufnehmen. Die komprimierte Zahnanordnung zeigt Vorteile im Tragverhalten. Jedoch werden im Beton Querschnitte festgestellt. Diese Querschnitte verlaufen von der Lasteinleitung ins Zentrum der Verzahnung des Druckknotens. An der betonseitigen großen Stahlverzahnung sind keine Schäden des

Betons aufgetreten. Die übertragbare Kraft kann bei der Zahngeometrie GT5 für einen Kraftneigungswinkel θ von etwa 28° je Zentimeter Einzelzahnlänge mit etwa $q_{sz}=2,8$ kN/cm angegeben werden, bei θ von etwa 33° sind es etwa 4,4 kN/cm, bei θ von etwa 47° sind es etwa 8,7 kN/cm. Der Versuch III/V6 mit der Zahngeometrie GT3 zeigt bei einem Kraftneigungswinkel θ von etwa 47° eine Kraftübertragung von etwa 29,5kN/cm.

Die Versuche am Knotenpunkt werden mit dem Computerprogramm Ansys simuliert. Die Konsole und die Stütze werden in einem dreidimensionalen Modell abgebildet mit der Finite-Element-Methode berechnet (Abb. 6.9). Die Berechnung erfolgt dabei geometrisch nichtlinear sowie physikalisch nichtlinear. Das globale Trag- und Verformungsverhalten kann mit dem Modell im elastischen Bereich gut abgebildet werden. Der plastische Bereich kann nur bedingt und nur bis zu einem geringen Lastniveau abgebildet werden. Lokale Bereiche, wie die Spannungen in den Zahnleisten sowie die Zugspannungen im Bereich der Querschlüsse können mit dem Modell gut nachvollzogen werden.

7. Versuche und Simulation zum modularen Fachwerkknoten mit Zahnleisten aus Stahl

7.1 Versuche zum Fachwerkknoten

7.1.1 Konzeption des Versuchsaufbau

Die Versuche zum Knotenpunkt im Maßstab 1 zu 1 werden mit der gleichen Prüfeinrichtung, wie die Versuche an den Konsolen, durchgeführt. Jedoch wird für den Knotenpunkt ein extra Widerlager entworfen, berechnet und konstruiert. Dabei wird das Widerlager so entworfen, dass der vertikale hydraulische Prüfstempel als Lasteinleitung für die Druckstrebe dient. Dazu wird der Fachwerkknoten um 45° gedreht. Die Konzeption des Widerlagers wird in Falter et al. (2018) beschrieben.

7.1.2 Prüfprogramm zum Fachwerkknoten

Tab. 7.1: Prüfprogramm Phase IV

Versuchsnr.	Zahngeometrie	Anordnung der Zähne	n Zahn S/B	n Zahn S/S	Neigung der Diagonalen $[\circ]$	Abmessungen b/t/L [cm]				Material Stahl	Material Beton
						Pfosten	Diagonale	Knoten-element	Gurt		
IV/V1	GT5	Gruppen	16	44	45	22/22/ 30	22/22/ 30	23,5/35/ 63	31/35/ 166	S 1	Ult
IV/V2					45						
IV/V3					45						
Ult = Ultralith						S/B = betonseitige Verzahnung Stahl/Beton					
S1 = Stahl S235 Charge 1						S/S = feine Stahlverzahnung; Zähne Stahl/Stahl					

7.1.3 Prüfkörper

Der Fachwerkknoten besteht aus dem Untergurt, dem Knotenelement, der Stütze und der Diagonale (Abb.7.1 rechts u. Tab. 7.1). Analog zu den Kleinversuchen (Phase II) und den Konsolversuchen (Phase III) werden die feinen Stahlzähne in Zahngruppen angeordnet. Es werden vier Zahngruppen mit 2×5 Zähnen (innen) und 2×6 Zähnen (am Rand) verwendet. Die Zahngruppen haben lichte Abstände von $102 - 94 - 102$ mm zueinander.

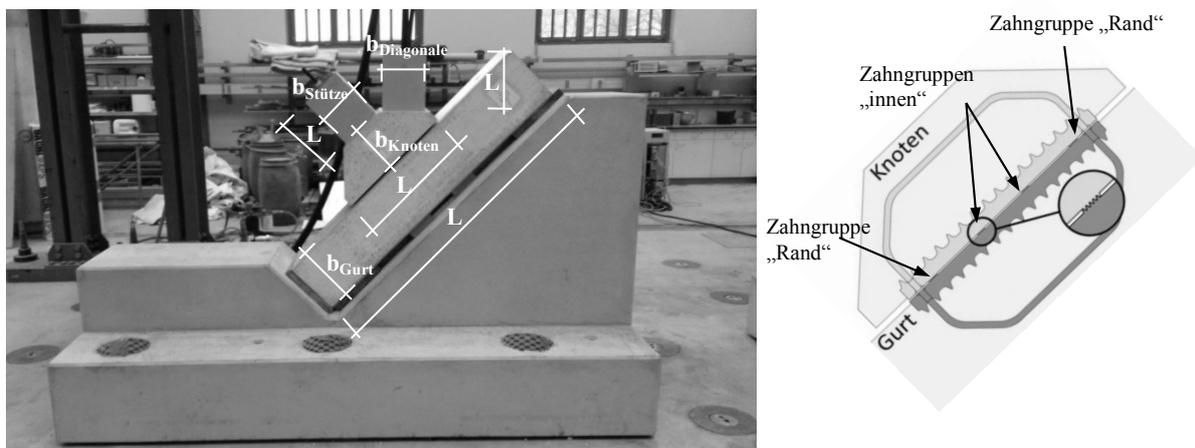


Abb.7.1: Prüfkörper Phase IV

7.1.4 Prüfmaschine und Messtechnik

Es wird dieselbe Prüfmaschine und Messtechnik wie bei den Versuchen an der Konsole (Kapitel 6.1.4) verwendet. Die IWA messen während des Versuchs die Verschiebungen des Pfostens in vertikaler

Richtung, jene des Knotenelements in axialer Richtung (parallele Verschiebung der feinen Stahlzähne) sowie die Verformung senkrecht zur Schubfuge (Abb.7.2).

7.1.5 Versuchsaufbau und Versuchsdurchführung

Der Fachwerkknoten wird bis auf die Diagonale auf dem Aufspannfeld vormontiert. Dazu werden die Stahlzähne des Knotenelements an die Stahlzähne des Gurtes platziert und der Pfosten darauf gesetzt (Abb. 7.1 u. 7.2). Der Pfosten wird über eine Gewindestange M22-10.9 mit dem Knotenelement und dem Gurt mit einem Drehmoment von 460Nm vorgespannt. Das entspricht nach DIN EN 1993-1-8/NA (2010), Tabelle NA.A.2 einer Vorspannkraft von etwa 135 kN. Die Krafteinleitung in den Beton erfolgt über Stahlplatten. Im Anschluss wird dieser Fachwerkknoten auf einem massiven Stahlbetonwiderlager unter einem Winkel von 45° platziert und die Diagonale mittig auf das Knotenelement gesetzt. Der vertikale Prüfstempel der Hydraulikpresse ist mittig über der Diagonale platziert und belastet diese. Zur Lasteinleitung in die Diagonale wird eine Stahlplatte verwendet. Die Kraft in der Diagonale wird über Druckkontakt in das Knotenelement einleitet. Die Zahnleisten werden so platziert, dass diese 6mm aus dem Beton heraussehen. Dadurch entsteht ein 12mm großer Spalt, in dem kein Beton ist und die Stahlverzahnung während des Versuchs eingesehen werden kann. Der Gurt liegt auf dem Widerlager sowohl stirnseitig als auch mit der Gurtunterseite auf Stahlplatten gelagert auf (Abb.7.2).

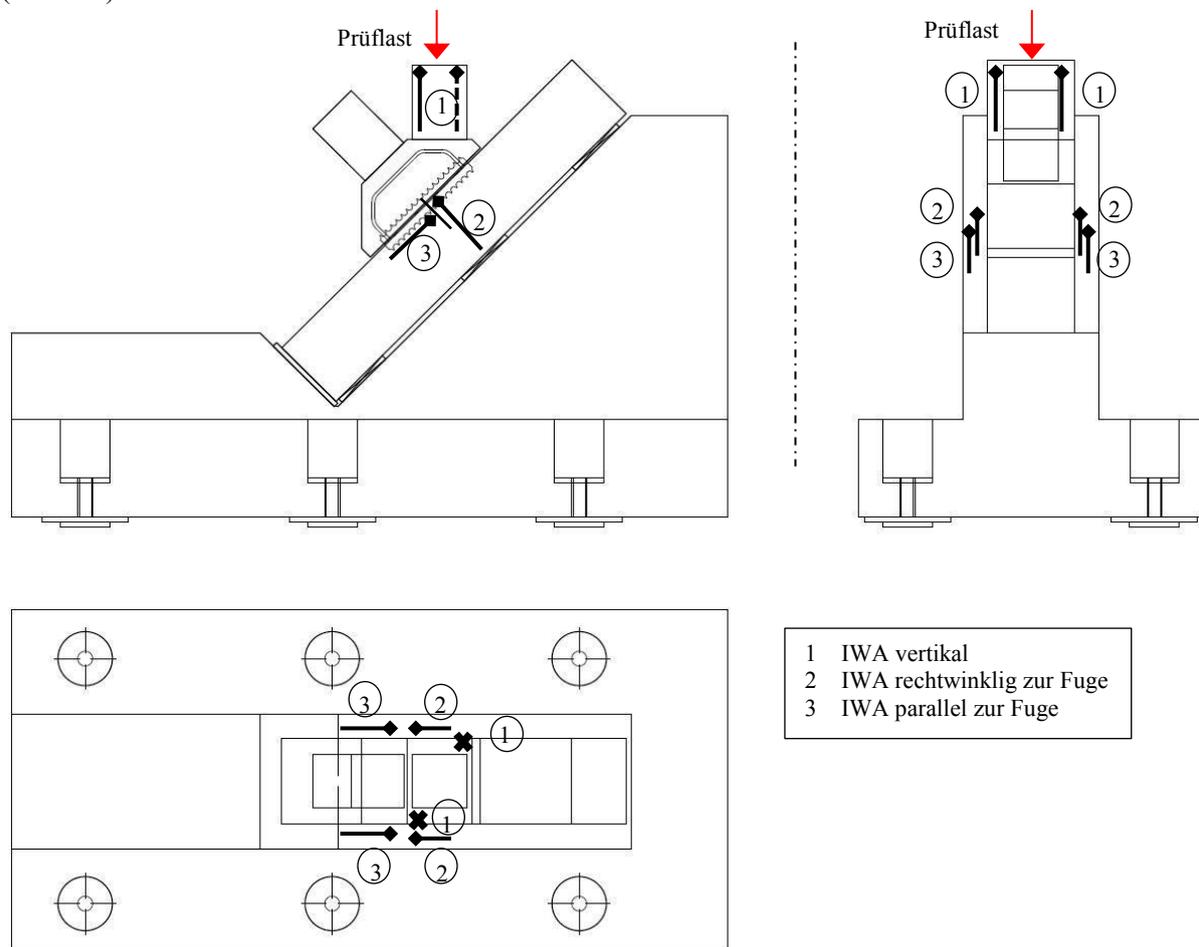


Abb.7.2: Lage der Wegaufnehmer

Die Stahlverzahnung in der Fuge zwischen Knotenelement und Gurt wird über eine Kraftkomponente aus vertikal eingeleiteter Prüflast sowie dem Anteil aus dem vorgespannten Pfosten belastet. Während des Versuchs werden die Prüflast sowie die Wege der IWA gemessen (Abb. 7.2). Zusätzlich wird die Verzahnung während des Versuchs gefilmt und fotografiert. Um die Wege in der Fuge auf den Fotos nachvollziehen zu können, wird an der Fuge eine Bemaßung angebracht und diese während des Versuchs gefilmt.

Die Prüflast wird in sieben Belastungs- und Entlastungsrampen auf die Diagonale des Knotenpunktes mit einer Prüfgeschwindigkeit von 0,01mm/sec. aufgebracht. Die Last wird auf 20kN gefahren und weiter auf 50 kN erhöht, sodass die Zähne in Kontakt kommen und der erste Schlupf minimiert wird. Es folgt eine Entlastung auf 20 kN. Im Anschluss werden drei Zyklen bis 200 kN und dann noch mal drei Zyklen bis 300 kN im elastischen Bereich gefahren (Tab. 7.2). Die Entlastung erfolgt bis 20kN. Alle drei Versuche werden mit den gleichen Eigenschaften und Abmessungen hergestellt, alle Versuche werden identisch durchgeführt. Die letzte Rampe wird bis zum Versagen gefahren.

Tab.7.2: Laststufen Knotenpunkt in kN

Rampe		1	2	3	4	5	6	7	8	9
1 ZL	Belastung	20	50	200		300				F_u
	Entlastung	-	20	20		20				-

7.1.6 Versuchsbeobachtungen und Messergebnisse

Kräfte am Fachwerkknoten während des Versuchs:

Die Gewindestange, welche die Diagonale, das Knotenelement und den Gurt durch Vorspannung (Kraft P) miteinander verbindet, wird mit einem Drehmomentschlüssel alternierend vorgespannt (Tab. 7.3).

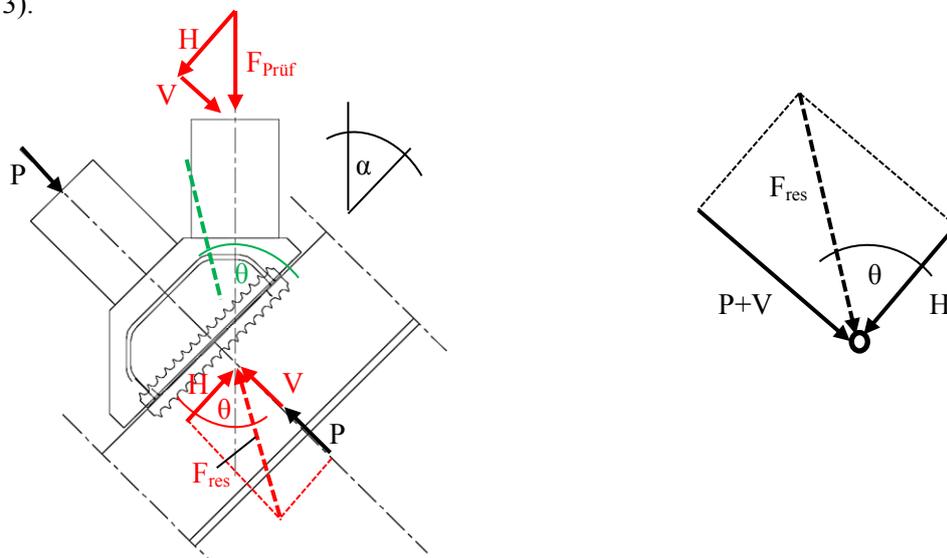


Abb. 7.3: Kräfte am Fachwerkknoten

Aus der vertikalen Prüflast $F_{\text{Prüf, vertikal}}$ und der Diagonalenneigung $\alpha = 45^\circ$ wird eine Kraftkomponente senkrecht zur Zahnleiste V und eine Kraftkomponente parallel zur Zahnleiste H berechnet.

$$V = H = \frac{F_{\text{Prüf, vertikal}}}{\sqrt{2}} \quad (\text{Gl. 7.1})$$

Unter Berücksichtigung der Vorspannkraft F_p wirkt die resultierende Kraft

$$F_{\text{Result}} = \sqrt{(V + P)^2 + H^2} \quad (\text{Gl. 7.2})$$

Die Kraft greift unter den Winkel θ an. Dieser berechnet sich zu

$$\theta = \tan^{-1} \left(\frac{V + P}{H} \right) \quad (\text{Gl. 7.3})$$

Trag- und Verformungsverhalten des Fachwerkknotens:

Die Versuche III/V1-V3 zeigen ein ähnliches Kraft-Verformungsverhalten. Sowohl bei der Messung der vertikalen Verformungen als auch bei den Verformungen parallel zur gezahnten Fuge (axial) verlaufen die Arbeitslinien nahezu übereinander (Abb. 7.4). Bei etwa 1300kN nehmen die plastischen Verformungen zu, bevor die Kraft im Verfestigungsbereich wieder bis zur Bruchlast ansteigt. Auch die Bruchlasten liegen nur max. 3 % auseinander.

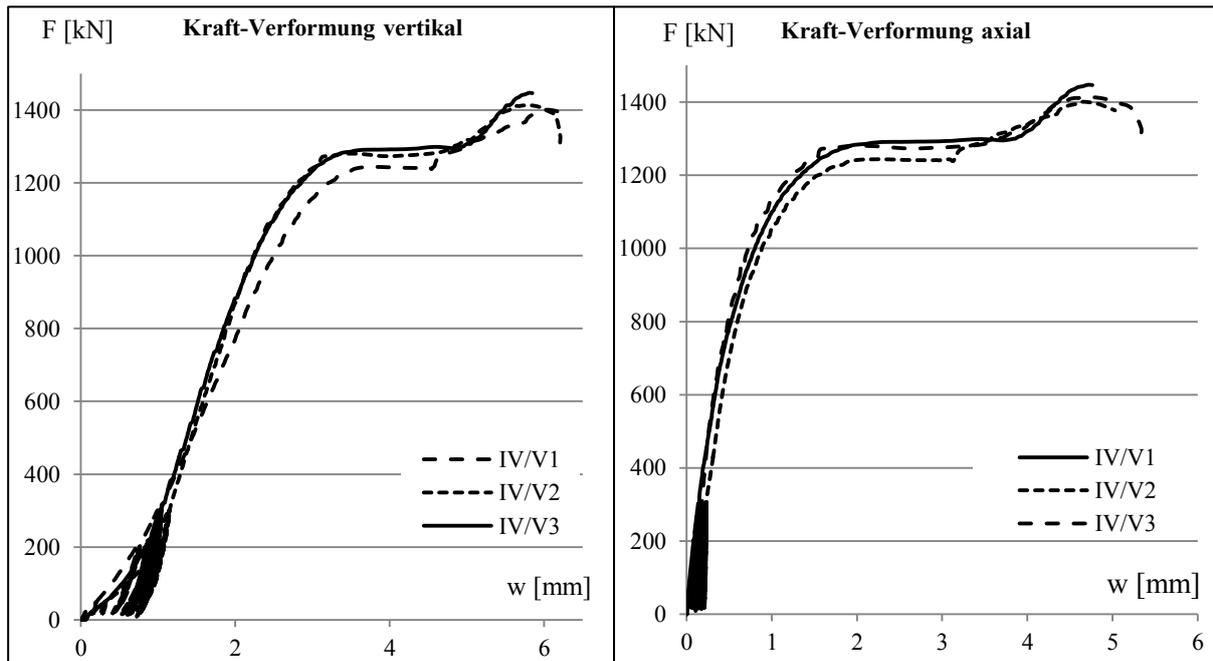


Abb. 7.4: Kraft-/Verformungskurve vertikal (links) und axial (rechts)

Tab.7.3: Bruchlasten der Knotenpunktversuche

Versuch	$F_{\text{Prüf. vertikal}}$ [kN]	P [kN]	F_{Result} [kN]	θ [°]
IV/V1	1401,8	135	1500,3	49
IV/V2	1414,1	135	1512,6	49
IV/V3	1448,3	135	1546,7	49

Die übertragbare Kraft für einen Kraftneigungswinkel θ von etwa 50° kann hier je Zentimeter Einzelzahnlänge mit etwa $q_{sz}=10$ kN/cm angegeben werden.

Schäden am Stahleinbauteil und an den Stahlzähnen:

Die Lasteinleitung durch die Diagonale und die weitere Lastkomponente durch den vorgespannten Pfosten führen zu einem außermittigen Lastangriff auf die Zahnleiste. Die vier Zahngruppen je Zahnleistenpaar besitzen einen unterschiedlichen Abstand zur Resultierenden der Lasteinleitung, was zu einer unterschiedlichen Beanspruchung der Zähne bzw. der einzelnen Zahngruppen führt. Die lastnahen Zahngruppen werden sehr stark zerdrückt (Abb. 7.5 links), die lastfernen Zahngruppen werden stark verformt (Abb. 7.5 rechts).



Abb. 7.5: Stark zerdrückte Zähne im Knotenelement nahe der Krafteinleitung (IV/V1) (links) und aufgebogene Zähne fern der Lasteinleitung (IV/V1) (rechts)

Schäden am Beton:

An einem Knotenelement entsteht ein Riss (Abb. 7.11). Dieser Riss hat keine Auswirkungen auf das Trag- und Verformungsverhalten des Fachwerkknotens. Weitere Schädigungen am Beton sind nicht entstanden. Trotz der komplexen Verbindungssituation gibt es keine nennenswerten Abweichungen

zum Verhalten der feinen Stahlzähne in den vorangegangenen Versuchsphasen I (Zahngeometrie), II (Kleinversuche) und III (Konsole).

Tab.7.4: Versuchsdaten der Versuche zum Fachwerkknoten

	Bezeichnung	Anzahl Zähne	Breite Zähne	Winkel der Resultierenden Kraft θ	Kraft aus Diagonale D	Senkrechte Komponente FV1 aus Diagonale	Senkrechte Komponente FV2 aus Vorspannung	Gesamtkraft senkrecht zur Fuge	Gesamtkraft parallel zur Fuge	Bruchlast FRes	Bruchlast pro cm Zahnlänge
IV/V1	Fachwerkknoten	44	3,5	48,6	1401,8	991,2	135	1126,2	991,2	1500,3	9,7
IV/V2	Fachwerkknoten	44	3,5	48,6	1414,1	999,9	135	1134,9	999,9	1512,6	9,8
IV/V3	Fachwerkknoten	44	3,5	48,5	1448,3	1024,1	135	1159,1	1024,1	1546,7	10,0

Zusammenfassend können die mit den feinen Stahlzähnen übertragbaren Kräfte je Zentimeter Einzelzahnlänge aus den Versuchsphase I bis IV dargestellt werden (Abb. 7.6). Diese sind bei den Versuchsphasen II, III und IV aufgrund der komplexer werdenden Versuchsaufbauten geringer als bei den Versuchen zur Zahngeometrie (Phase I).

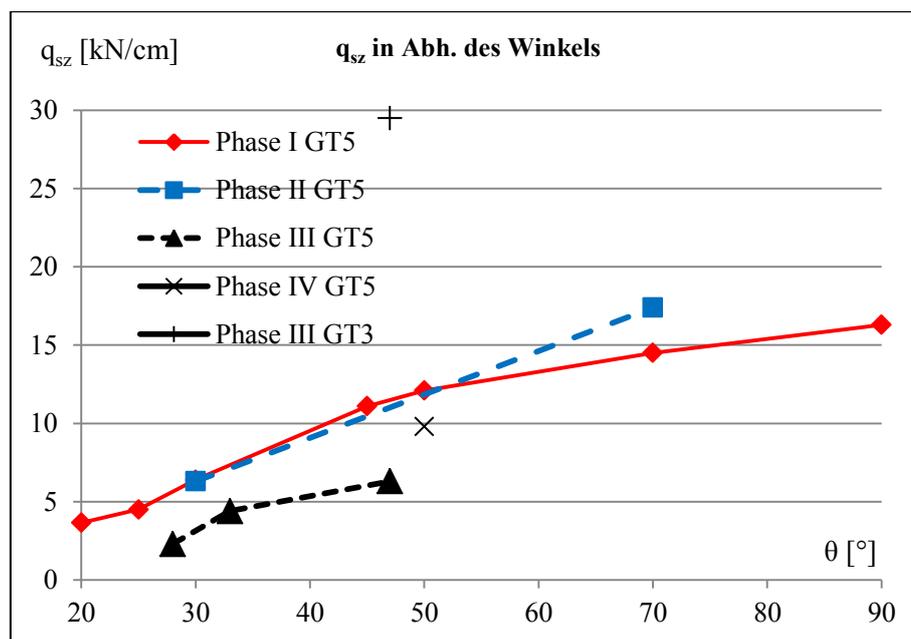


Abb. 7.6: Übertragbare Kräfte je Zentimeter Einzelzahnlänge für die Versuchsphasen I bis IV

7.2 Simulation zum Fachwerkknoten

7.2.1 Simulationsmodell

Analog zu Kapitel 6.2.1 wird der Fachwerkknoten mit den Einzelkomponenten, dem Gurt, dem Knotenpunkt, der Zahnleiste, der Stütze und der Diagonale inklusive der Vorspannung als dreidimensionales Modell abgebildet (Abb. 7.7). Die Berechnung erfolgt auch hier mit der Finite Element-Methode geometrisch nichtlinear sowie physikalisch nichtlinear. Die angesetzten Werkstoffmodelle entsprechen dem Kapitel 3.5 und 4.2, die Simulationsgrundlagen dem Kapitel 3.6. Auch beim Fachwerkknoten wird ein Halbmodell verwendet. Aufgrund des komplexen Modells wird das Modell in mehrere Submodelle unterteilt. Damit können die feinen Stahlzahngruppen mit einem feinen Netz, die Zahnleiste jedoch mit einem größeren Netz abgebildet werden.

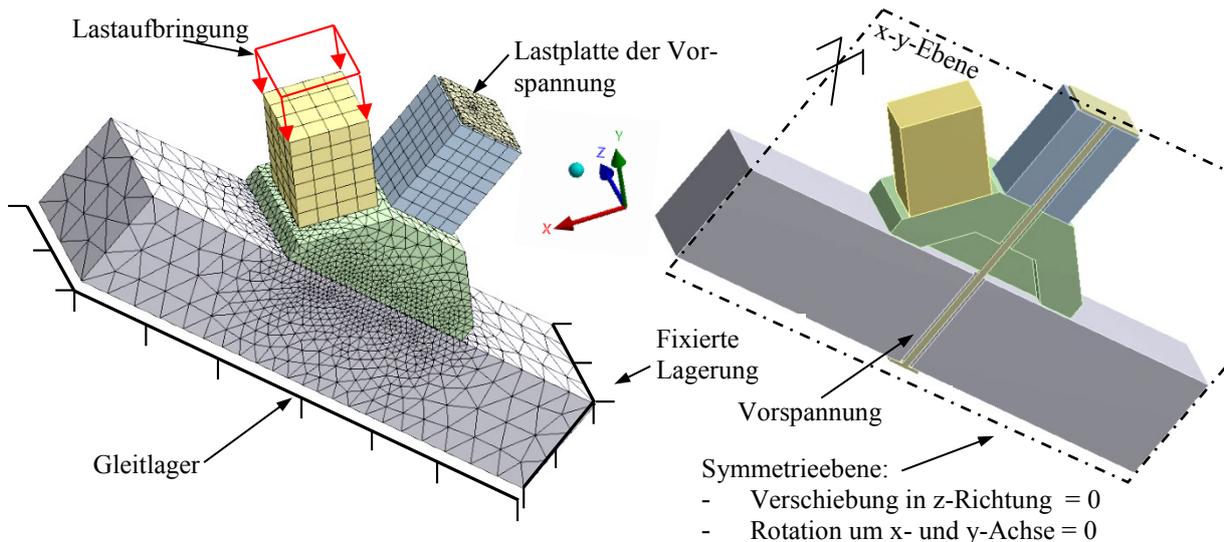


Abb. 7.7: FEM-Modell des Fachwerkknotens

Lagerung:

Der Gurt wird an der Gurtstirnseite mit einer Einspannung modelliert und an der Gurtlängsseite gleitend gelagert (Abb. 7.7). Durch die eingespannte Lagerung der Stirnseite wird die Berechnung numerisch stabil gehalten. An dieser Stelle hat die Einspannung die geringsten Auswirkungen auf das Trag- und Verformungsverhalten des Fachwerkknotens. Die aktivierte Reibung an den Stahlplatten zwischen Gurtlängsseite und Widerlager, wie sie im Versuch vorhanden sind, wird vernachlässigt. Die Ergebnisse der Parameterstudie zur Betrachtung der Lagersituation (Kapitel 3.7) zeigen, dass diese Lagerung als auf der sicheren Seite liegend betrachtet werden kann. Die weiteren Bauteile werden über den Kontakt und die dabei aktivierte Reibung in der Lage gesichert.

Vorspannung:

Wie im Versuch, so werden auch im Modell die Elemente Gurt, Knotenelement und Pfosten über eine verbundlos vorgespannte Gewindestange M22-10-9 zusammengehalten. An den Enden der Gewindestange werden zwei Stahlplatten modelliert (Abb. 7.8). Die Verbindung zwischen der Gewindestange und den Stahlplatten erfolgt über einen Verbund (Knoten halten sechs Freiheitsgrade fest). Diese Gewindestange wird mit der Vorspannkraft P vorgespannt (Tab. 7.3). Die Lasten aus Vorspannung werden über die Stahlplatten in den Betonquerschnitt eingeleitet.

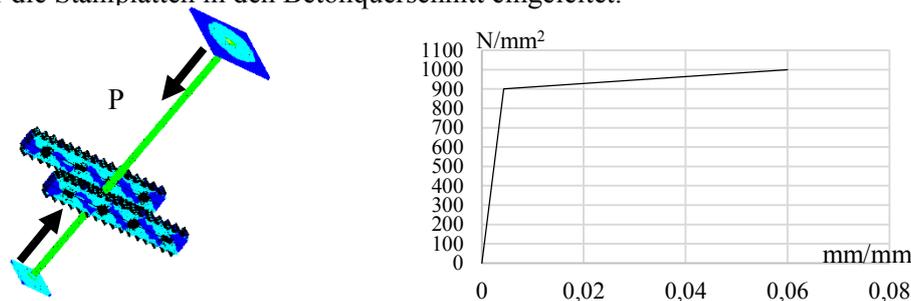


Abb. 7.8: Vorspannung mit Lasteinleitungsplatten mit Materialmodell des Spannstahls

Die Materialformulierung der Gewindestange erfolgt analog zu Kapitel 6.2.

Belastung:

In einem ersten separaten Lastschritt wird die Vorspannkraft auf das System aufgegeben. Dieser Zustand dient als Ausgangssituation für die Lastaufgabe der Prüflast. Diese wird in 11 Lastschritten als konstante Flächenlast auf die Oberseite der Diagonale aufgebracht.

Kontakte:

Die Berührflächen der einzelnen Bauteile zueinander werden als Kontakte mit Kontaktbedingungen definiert. Diese können Druckkräfte und Reibkräfte übertragen. Weiterhin kann der Kontakt auch als Verbund definiert werden. Hierbei werden sechs Freiheitsgrade gehalten.

Tab.7.4: Kontaktbedingungen zur Simulation des Fachwerkknotenpunkts

Bauteile	Kontakt	Reibbeiwert
Lastplatte der Vorspannung mit Betonquerschnitt Diagonale	Verbunden	-
Lastplatte der Vorspannung mit Betonquerschnitt Gurt	Verbunden	-
Betondiagonale an Betonknotenpunkt	Verbunden	-
Betonstütze an Betonknotenpunkt	Verbunden	-
Zahnleiste an Beton	Verbunden	-
Zahnleisten an Zahnleiste (feine Verzahnung)	Reibungsbehaftet	0,15

7.2.2 Simulationsergebnis

Globales Last-/Verformungsverhalten

Das Last- und Verformungsverhalten der vertikalen Messung durch IWA unterhalb der Lasteinleitungsplatte kann mit dem FE-Modell bis zu einer Prüflast von 1150kN gut abgebildet werden. Dabei werden zwei Rechnungen gezeigt. Rechnung 1 hat möglichst realistische Steifigkeiten aus Geometrie und Material. Bei Rechnung 2 wird eine reduzierte Steifigkeit angenommen somit die Verformungen verdoppelt. Diese Arbeitslinie würde sich mit der des Versuchs nahezu decken. Der Unterschied zwischen der Arbeitslinie des Versuchs und der aus Rechnung 1 ist mit Differenzen der Steifigkeit des Versuchs und der des FE-Modells zu begründen. Dieses kommt zum einen aus dem Gesamttragverhalten der komplexen Verbindung, zum anderen aus lokalen Effekten. Maßgebend sind hier die Fertigungsungenauigkeiten des Wasserstrahlschneidens zu nennen. Dadurch ist die Kontur der Stahlzähne des Versuchs kleiner als die im FEM-Modell. Dies führt im FE-Modell zu einer höheren Steifigkeit der Verbindung.

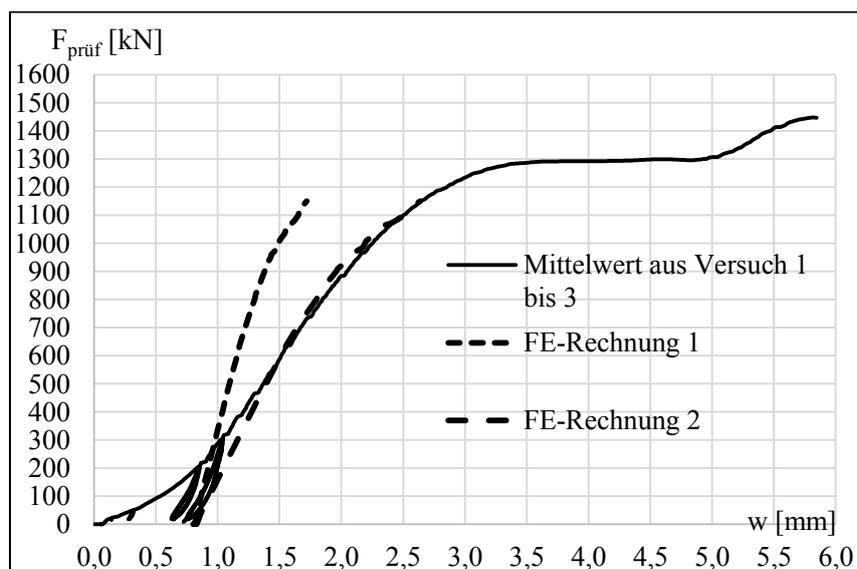


Abb. 7.9: Kraft-/Verformungskurve des Knotenpunktversuchs der vertikalen Messung, Vergleich Versuch und FEM

Kraftfluss im Prüfkörper

Die FE-Rechnung zeigt nahe der Lasteinleitung aus der Diagonale größere Vergleichsspannungen an den feinen Stahlzähnen als in den weiter entfernten Zahngruppen (Abb. 7.10). Dies deckt sich mit den Versuchsergebnissen (Abb. 7.5).

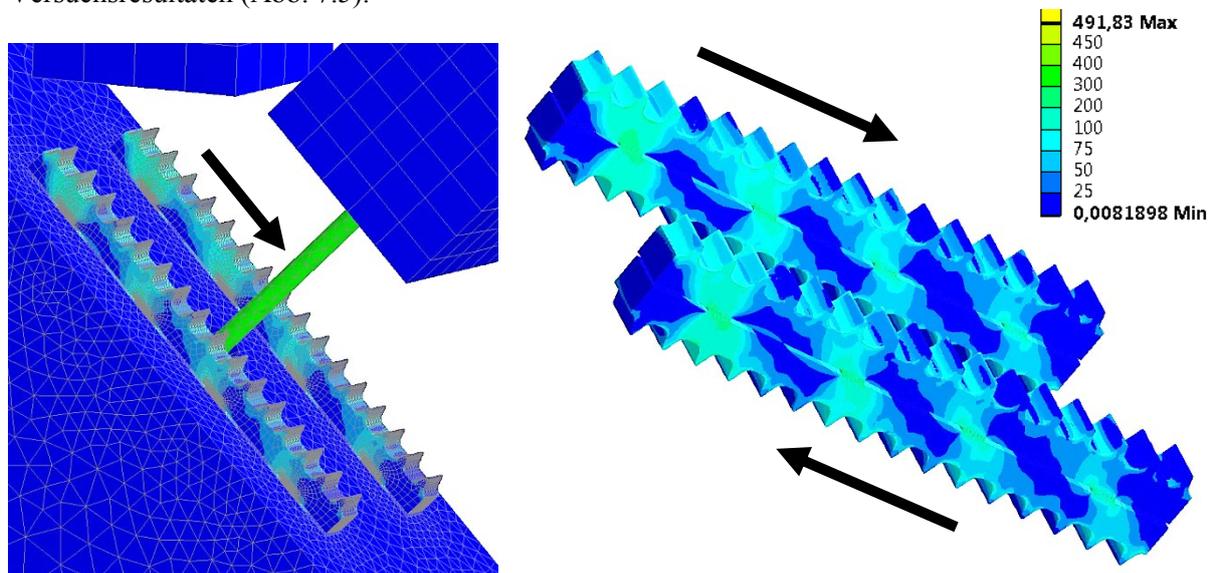


Abb. 7.10: Vergleichsspannungen an der Zahnleisten im Knotenpunkt

Verhalten des Betons

Der Beton zeigt bei den Versuchen IV/1 bis IV/3 nur bei einem Versuch eine Rissbildung am Knotenelement (Abb. 7.11). Spannungserhöhungen in diesem Bereich sind auch bei der FE-Rechnung zu erkennen.

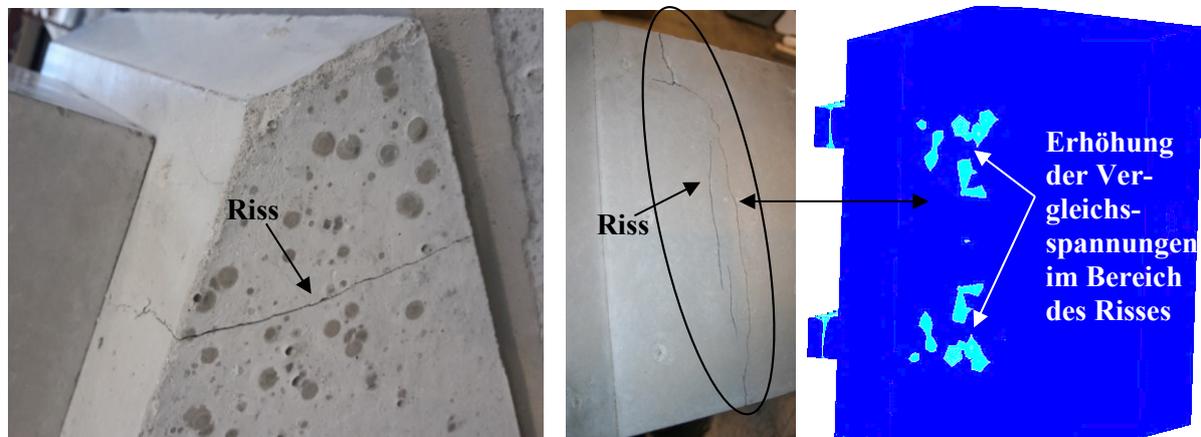


Abb. 7.11: Riss im Knotenelement (links u. mitte) und Spannungserhöhung im FE-Modell (rechts)

7.3 Zusammenfassung der Versuche und Simulationen zum Fachwerkknoten

Analog zu Kapitel 6, wird in Kapitel 7 eine weitere Anwendung – der Fachwerkknoten – getestet. Hierzu wird ein massives Stahlbeton-Widerlager entworfen, auf das der Fachwerkknoten um 45° gedreht, aufgelegt wird. Dadurch kann die Lastaufbringung durch den vertikalen hydraulischen Prüfstempel senkrecht auf die Diagonale erfolgen. Das Widerlager wird über sechs Lagerpunkte im Hallenboden der Peter Behrens Halle der TU Berlin verspannt. Der Prüfkörper besteht aus einem Gurt, einem Knotenpunkt, einer Stütze und einer Diagonale. Die Diagonale wird mit einer Gewindestange mit 460Nm (etwa 130kN) vorgespannt. Alle drei Versuche werden identisch durchgeführt. Das Trag- und Verformungsverhalten (Messung vertikal und axial) der Versuche ist gleich (Abb. 7.4). Auch die Bruchlasten der Versuche IV/V1 und IV/V3 liegen nur etwa 3% auseinander. Die Bruchlast des Versuchs IV/V2 liegt dazwischen. Beim Fachwerkknoten wird die Prüflast außermittig auf die Zahnleiste gebracht. Da auch hier die feinen Stahlzähne in Zahngruppen angeordnet sind, gibt es lastnahe und

lastferne Zahngruppen (Abb. 7.5). Das Versagensbild dieser Zahngruppen zeigt, dass die lastnahen Zahngruppen sehr stark, während die lastfernen Zahngruppen weniger stark beschädigt sind. Dieses Verhalten zeigt auch der Kraftfluss, in dem analog zu Kapitel 6 aufgebauten FE-Modell des Fachwerkknotens. Bei einem Versuch reißt der Beton im Knotenelement. Dies hat jedoch keinen Einfluss auf das Trag- und Verformungsverhalten des Knotenelements sowie des gesamten Prüfkörpers. Die übertragbare Kraft für einen Kraftneigungswinkel θ von etwa 50° kann je Zentimeter Einzelzahnlänge mit etwa $q_{sz}=10$ kN/cm angegeben werden.

8. Ingenieurmodell zum Tragverhalten der Stahlverzahnung

Im Folgenden soll die eingeleitete Belastung der Zahnflanken in Abhängigkeit der Gesamtkraft, Neigungswinkel, Zahnhöhe, sowie Leistenbreite untersucht werden. Die Verbindung des Zahnleistenpaares wird durch die Kraft parallel zur Zahnleiste $F_{\parallel, Ges}$ und die Kraft rechtwinklig zur Zahnleiste $F_{\perp, Ges}$ beansprucht. Je nach Kraftverhältnis stellt sich die Neigung β der resultierenden Kraft F_{Ges} gegenüber der Fugenachse ein (Abb. 8.1).

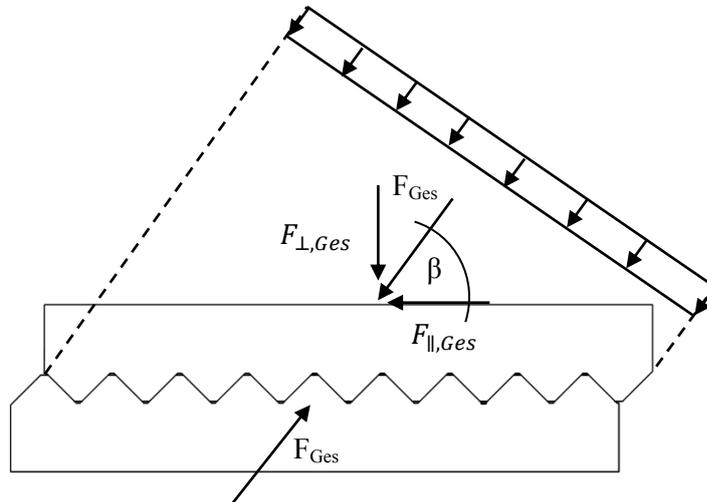


Abb. 8.1: Kraftangriff auf die Stahlzahnleiste

Die an den Einzelzähnen angreifenden Druckstreben mit der resultierenden Kraft F_Z je Zahn treffen auf eine Zahnflankenfläche von $L_{Z, Kraft}$ multipliziert mit der Zahnflankenbreite b_Z (Abb. 8.2). Die resultierende der angreifenden Belastung wird mittig im Schwerpunkt der Druckstrebe angesetzt. Die Höhe der resultierenden Belastung zum Zahngrund bzw. zum maßgebenden Bemessungsschnitt wird mit $h_{Ze, i}$ bezeichnet.

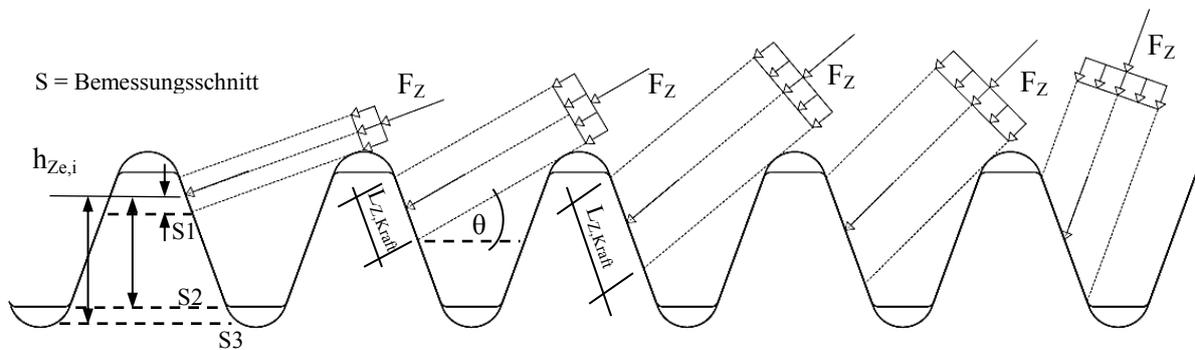


Abb. 8.2: Kraftangriff auf die Stahlzahnleiste unter Kraftangriffswinkeln $\theta = 20^\circ, 30^\circ, 45^\circ, 50^\circ, 70^\circ$

Ausgehend von diesem Ansatz wird das Ingenieurmodell entwickelt. (Abb. 8.3).

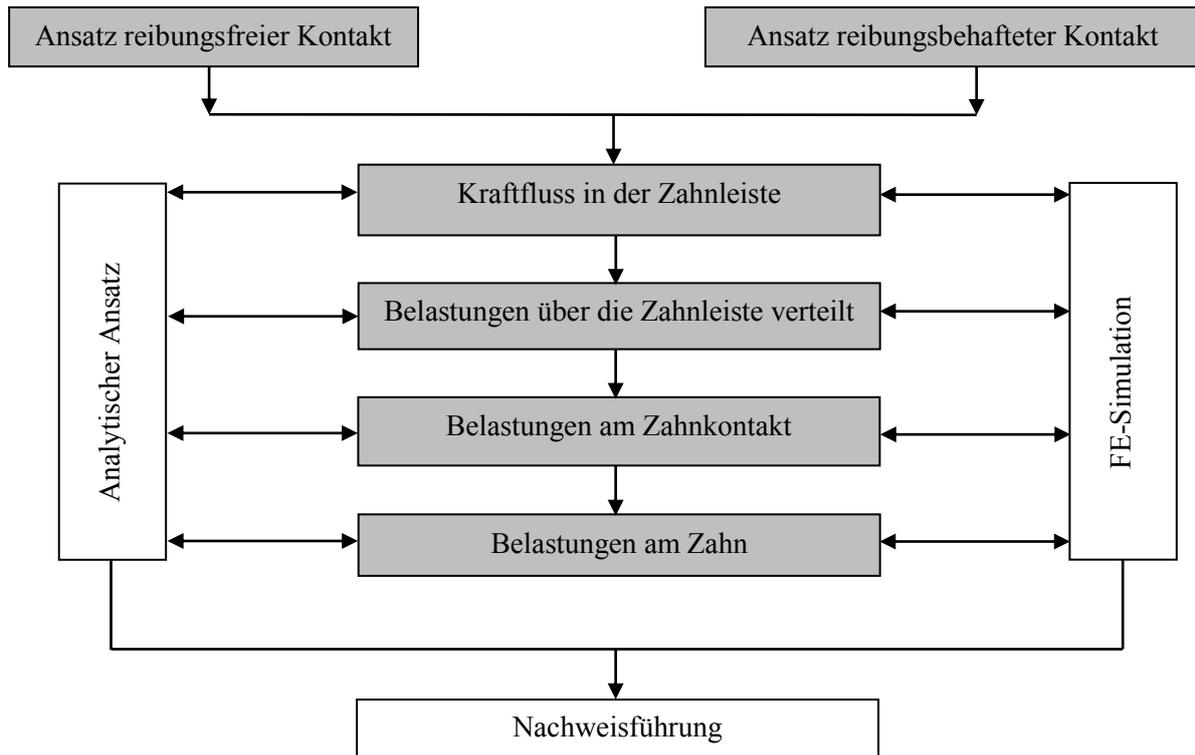


Abb. 8.3: Schematischer Ablauf bei der Entwicklung des Ingenieurmodells

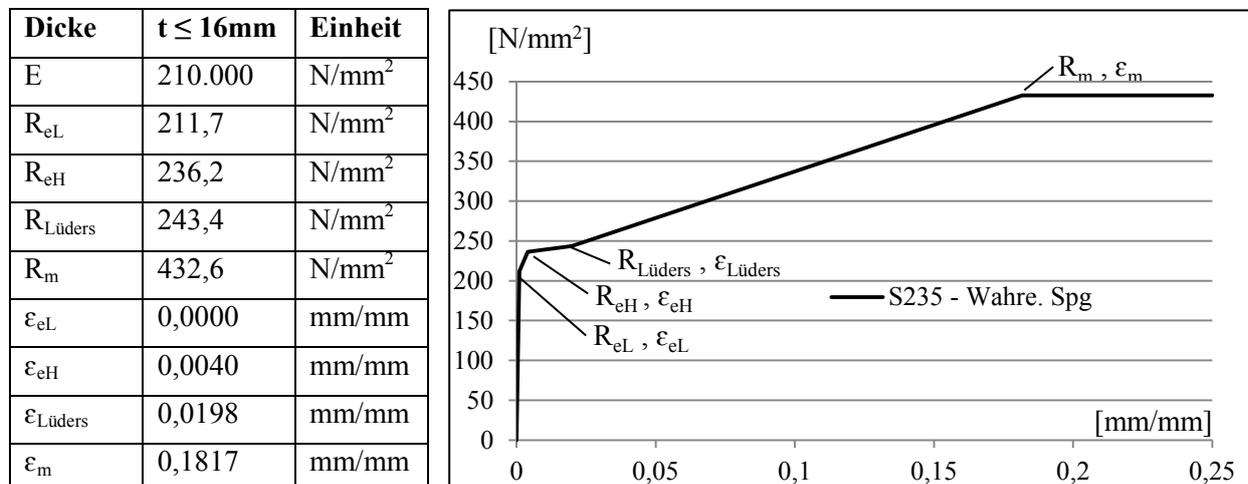
8.1 Numerische Parameterstudie zum Verhalten der Stahlverzahnung

8.1.1 Simulationsgrundlagen

Es werden geometrisch nichtlineare FE-Berechnungen durchgeführt. Dabei werden ein reibungsfreier und ein reibungsbehafteter Kontakt untersucht. Die Simulationsgrundlagen sind in Kapitel 3.6 aufgeführt. Nachfolgend werden davon abweichende beziehungsweise ergänzende Angaben gemacht.

Es wird ein Stahl S235 mit einem Elastizitätsmodul von 210.000 N/mm^2 , einer Querkontraktionszahl $\nu = 0,3$, einem Schubmodul $G = 80769 \text{ N/mm}^2$ und ein Kompressionsmodul $K = 1,75 \cdot 10^5 \text{ N/mm}^2$ verwendet. Die FE-Berechnungen werden mit einem linear-elastischen Materialverhalten und mit nichtlinearem Materialverhalten durchgeführt. Das nichtlineare Materialmodell wird über einen bilinearen Ansatz mit dem Tangentenmodul $M_T = 789 \text{ N/mm}^2$ (vgl. Abb. 3.16) sowie über einen multilinearen Ansatz nach DNV (2013) (Tab. 8.1) berücksichtigt.

Tab. 8.1: Materialmodell des multilinearen Ansatz für S235, $t \leq 16\text{mm}$ nach (DNV 2013)



8.1.2 Simulationsmodell und Belastung

Zur besseren Einschätzung des Lastflusses sowie der Belastungsverteilung in der Zahnleiste wird eine Parameterstudie an einem System von zwei aufeinander liegenden Stahlzahnleisten durchgeführt. Das statische System erfolgt mit Lagersituation 2 (vgl. Kap. 3.7). Die Last wird konstant auf die gesamte Oberkante der oberen Zahnleiste aufgebracht (Abb. 8.4). Die Kraftübertragung zwischen den Zahnleisten erfolgt über Kontakt an den feinen Stahlzähnen. Für die folgenden Untersuchungen gilt, dass $\beta \geq 20^\circ$ ist.

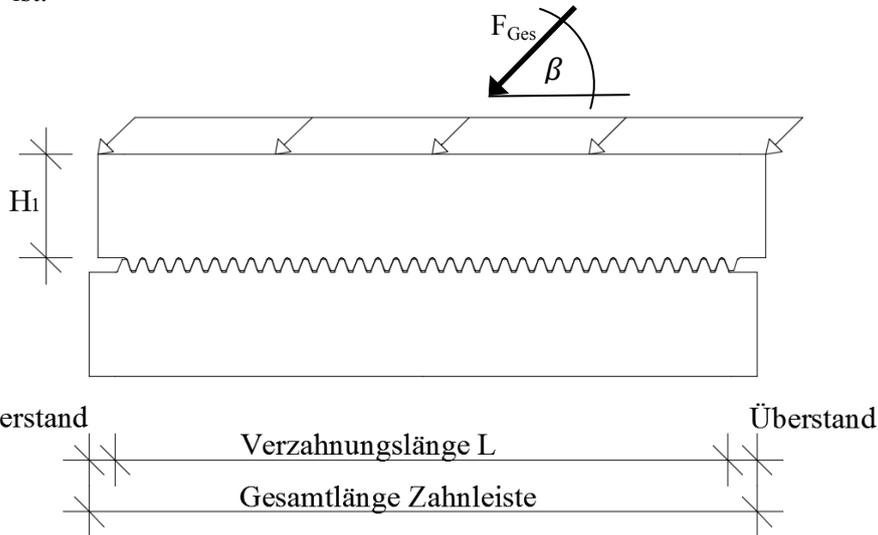


Abb. 8.4: Zahnleiste mit Belastung und Bezeichnung

8.1.3 Parameterstudie zu den Pressungen an der Zahnflanke

In Parameterstudien werden geometrische und mechanische Einflüsse auf die Beanspruchungen in der Zahnleiste untersucht (Tab. 8.2 u. 8.3).

Tab. 8.2: Studie zum allgemeinen Verhalten der Kraftübertragung entlang der Zahnleiste

Untersuchter Einfluss	Anzahl Zähne	L_{Ges} [mm]	$L_{Verz.}$ [mm]	Über- Stand [mm]	H_1 [mm]	Kraft \perp [kN]	Kraft \parallel [kN]	β [°]
Ausgangssystem	34	117,6	117,6	0	20	170	170	45
verringerte Zahnanzahl	17	58,8	58,8	0	20	170	170	45
erhöhten Zahnanzahl	51	176,5	176,5	0	20	170	170	45
verringerten Kraft	34	117,6	117,6	0	20	17	17	45
Zahnleistenhöhe	34	117,6	117,6	0	30	170	170	45
Verlängerung der Leiste über die Zähne hinaus	34	117,6	117,6	5	20	170	170	45
Lastneigung $\beta = 90^\circ$	34	117,6	117,6	0	20	170	0	90
Lastneigung $\beta = 20^\circ$	34	117,6	117,6	0	20	62	170	20

Tab. 8.3: Studie zum Einfluss der Kraft und des Kraftneigungswinkels auf die Pressungen

Studie	System	Kraft [kN]	Winkel [°]
Einfluss der Kraft	Ausgangssystem (nach Tab. 8.2)	10 Lastschritte von $F_{\parallel} = F_{\perp} = 20\text{kN}$ bis 200kN	45
Einfluss des Kraftneigungswinkels	Ausgangssystem (nach Tab. 8.2)	$F_{Res} = 150\text{kN}$	30, 40, 50, 60, 70, 80, 90

8.2 Interpretation und Darstellung des Kraftflusses in der Zahnleiste mit Hilfe von Stabwerkmodellen

8.2.1 Kraftfluss mit reibungsfreiem Kontakt

Die Berechnung erfolgt für ein linear-elastisches Materialmodell. Für nichtlineares Materialverhalten werden Vergleichsrechnungen durchgeführt und Aussagen getroffen. Die Betrachtung ist geometrisch nichtlinear. Der Kraftfluss in der Zahnleiste verläuft beim reibungsfreien Kontakt s-förmig (Abb. 8.5).

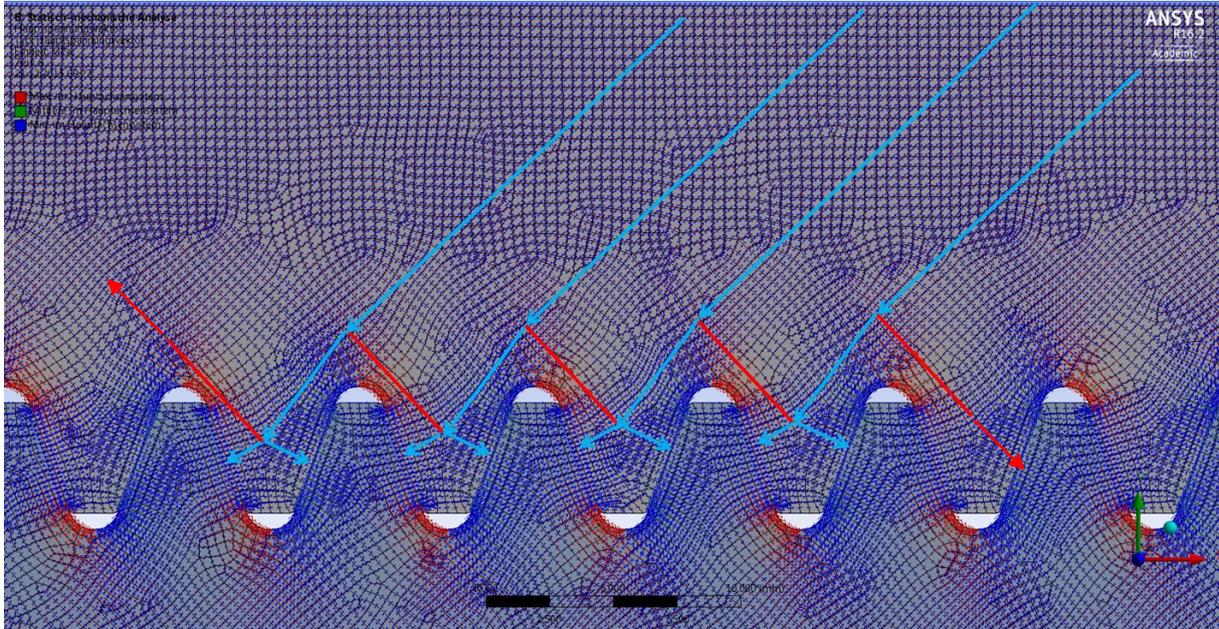


Abb. 8.5: Kraftverlauf in der Zahnleiste in einer physikalisch linearen und geometrisch nichtlinearen FE-Rechnung

Die Belastung (vgl. Abb. 8.2) wird umgelenkt, sodass die Kraft F_Z um das Maß e versetzt mittig an der Zahnflanke angreift. Das ist möglich, da die Stahlzähne die dafür notwendigen Biegespannungen aufnehmen können. Am Zahn entsteht dadurch das Biegemoment $F_Z \cdot e$. Diese Biegung und die dadurch mögliche Richtungsänderung wird im Stabwerksmodell mit der Zugkraft T dargestellt (Abb. 8.6).

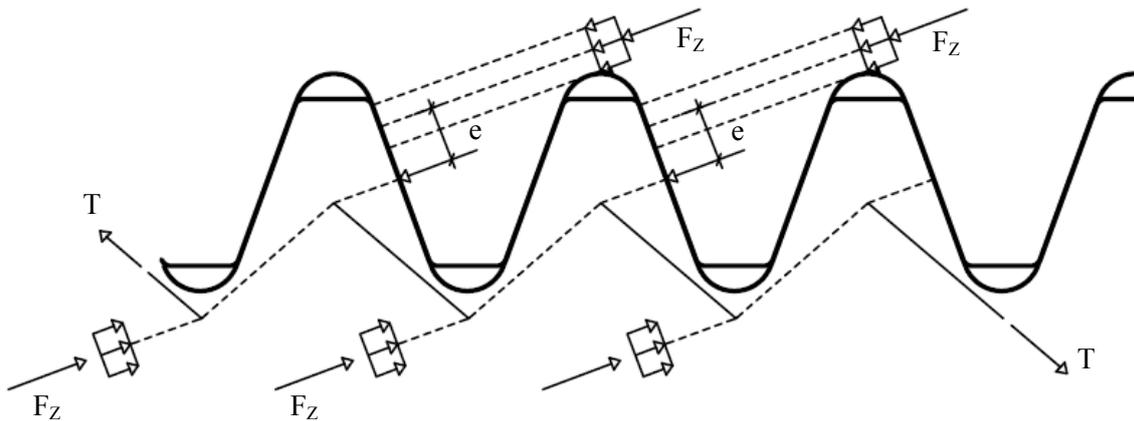


Abb. 8.6: Kraftangriff, Versatzmaß e für Winkel $\theta = \beta$

Das Moment $\sum F_Z \cdot a_F$ steht an der global betrachteten Zahnleiste mit dem Moment aus $\sum T \cdot a_T$ im Gleichgewicht (Abb. 8.7).

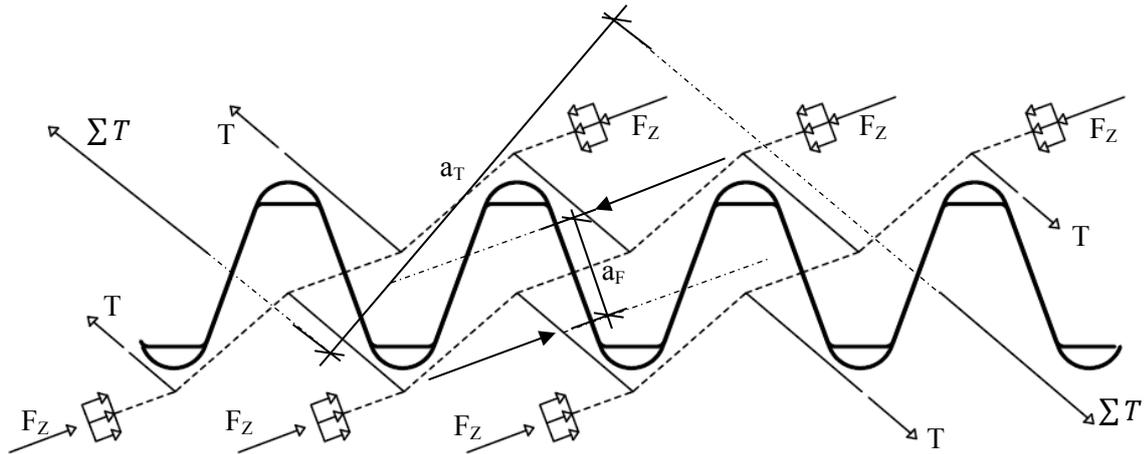


Abb. 8.7: Gleichgewicht an der global betrachteten Zahnleiste

Wird die Zahnleiste durch eine Kraft F_{ges} mit dem Kraftangriffswinkel $\beta > \theta$ belastet, wird auf der lastabgewandten Seite eine zusätzliche Druckkraft ΔF_Z erforderlich (Abb. 8.8).

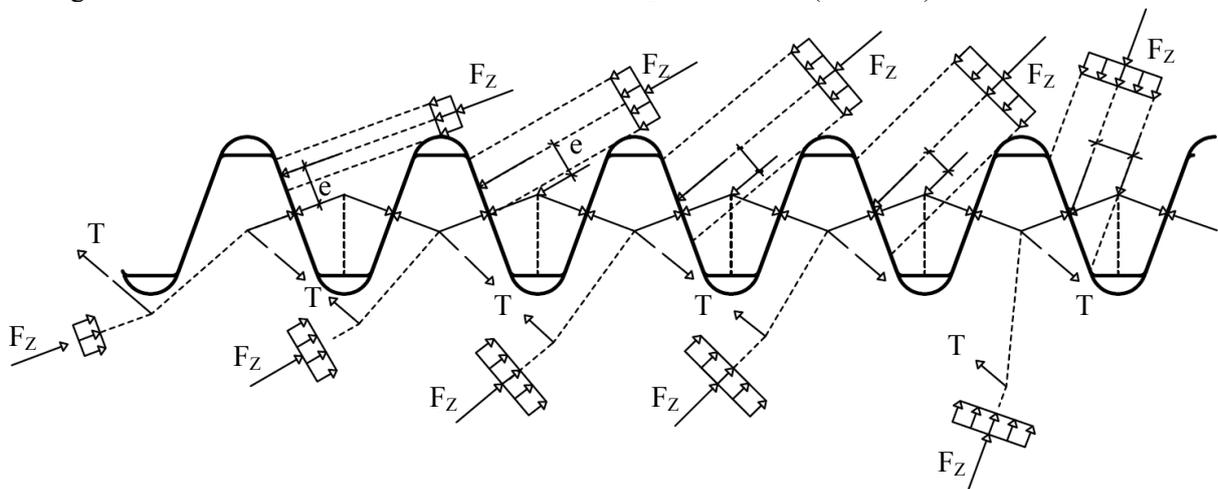


Abb. 8.8: Kraftangriff, Versatzmaß e und für Winkel $\theta < \beta$

Für den analytischen Ansatz wird von einer gleichmäßigen Lastaufteilung auf die einzelnen Zähne ausgegangen (Abb. 8.9). Dieser Ansatz wird durch die nachfolgenden numerischen Berechnungen für das linear-elastische Materialverhalten durch den Faktor k_j (vgl. Tab. 8.5) konkretisiert und für das plastische Materialverhalten bestätigt.

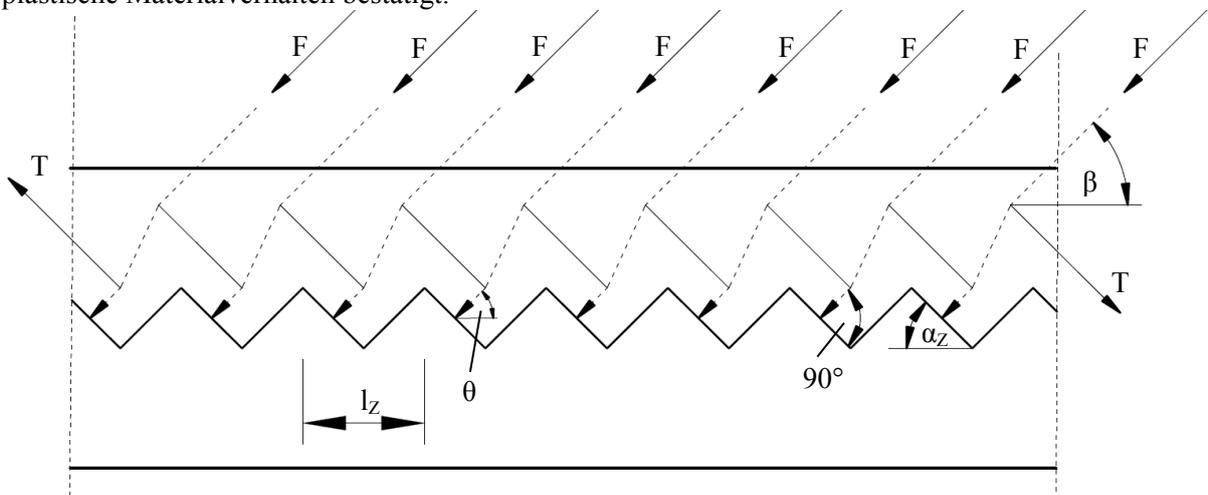


Abb. 8.9: Aufteilung der Kräfte auf die Verzahnung

Bei gleichmäßiger Kraftaufteilung Kraft F_{ges} gilt

$$F = \frac{F_{ges}}{n_z} \quad (Gl. 8.1)$$

F_{ges} = resultierende Gesamtkraft

n_z = Anzahl der Zähne

Über den Zahnabstand l_z kann die Anzahl der Zähne aus der Gesamtverzahnungslänge l_{ges} bestimmt werden (Abb. 8.10).

$$n_z = \frac{l_{ges}}{l_z} \quad (Gl. 8.2)$$

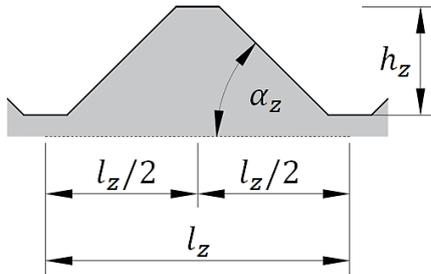


Abb. 8.10: Betrachtung eines Einzelzahns

Setzt man dies in Beziehung mit der Kraft F , die ein Zahn erfährt, gilt

$$F = \frac{F_{ges}}{n_z} = \frac{F_{ges} \cdot l_z}{l_{ges}} \quad (Gl. 8.3)$$

Die Kraft, welche in die obere Zahnleiste eingeleitet wird, muss mit der Reaktionskraft der unteren Zahnleiste im Gleichgewicht stehen. Bei reibungsfreier Lagerung steht die Kraft unter einem Winkel von 90° auf der Zahnflanke. Die Kraft verläuft in der Zahnleiste s-förmig (Abb. 8.5). Dieser Verlauf bedingt die Zugkräfte T , die an den Umlenkstellen angreifen und gleich groß sind. Für $\theta = \beta$ wird die Kraft F am oberen und unteren Umlenkpunkt gleichmäßig umgelenkt, sodass die angreifende Kraft F und die Kraft auf der Zahnflanke in Krafrichtung F_z parallel verlaufen (Abb. 8.11). Dabei ist bei reibungsfreiem Kontakt θ festgelegt zu $\theta = 90^\circ - \alpha_z$. Hier ist $\alpha_z = 70^\circ$ und somit folgt $\theta = 20^\circ$. Für $\theta \neq \beta$ trifft dies nicht zu. Für $\theta < \beta$ wirkt eine zusätzliche Druckkraft ΔF_z auf die Umlenkstelle, diese bewirkt eine zusätzliche Richtungsänderung (Abb. 8.12 u. 8.13 u. 8.14). Für reibungsfreien Kontakt ist $\theta > \beta$ unmöglich, da die reibungsfreien Zähne übereinander hinweggleiten würden.

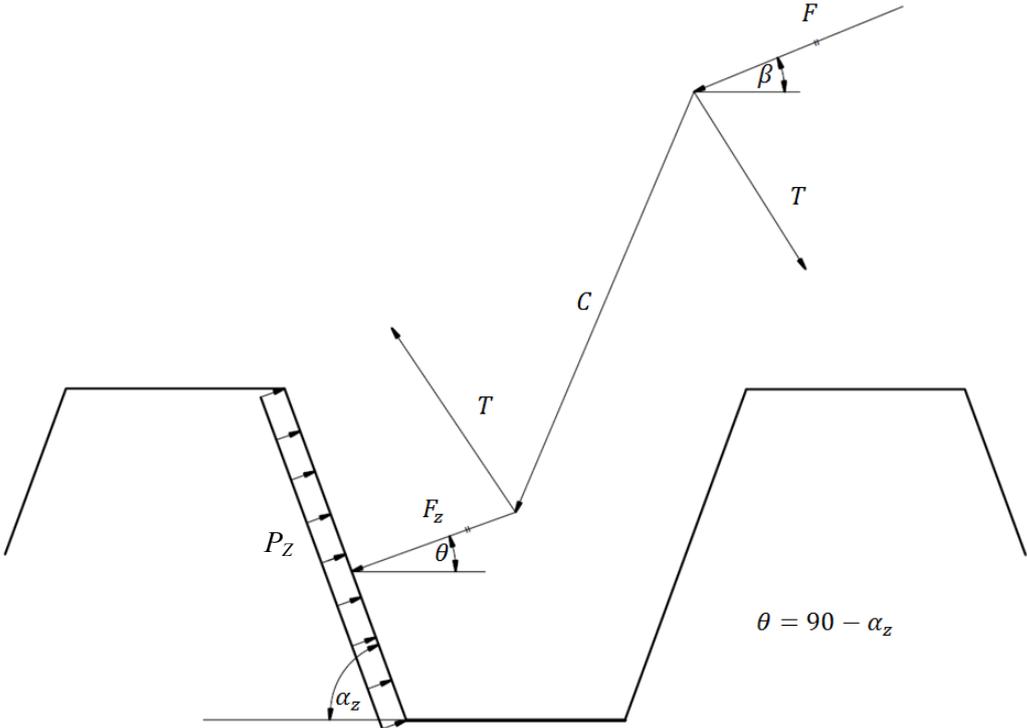


Abb. 8.11: Transformation von F wenn $\theta = \beta$

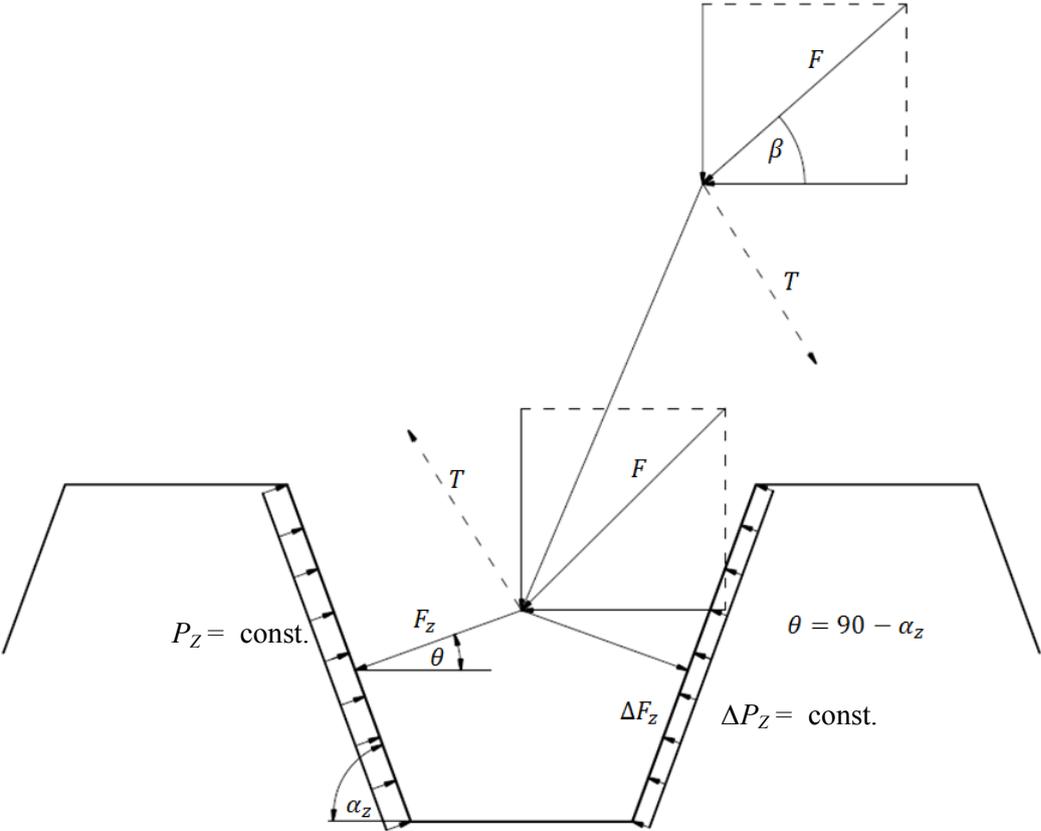


Abb. 8.12: Transformation von F wenn $\theta < \beta$

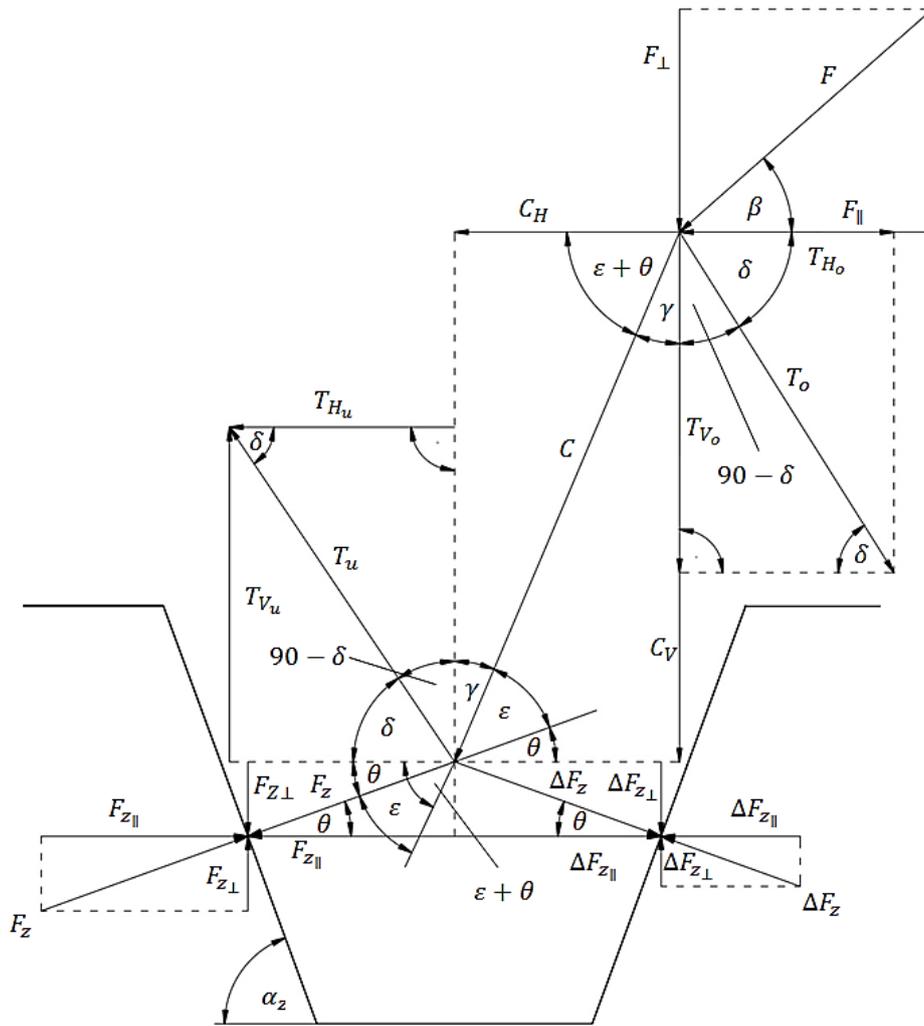


Abb. 8.13: Vergrößerte Darstellung des Kraftflusses im Zahn

Unter Berücksichtigung der zusätzlichen Druckkraft ΔF_z auf die lastabgewandte Zahnflanke kann die Aufteilung der Kräfte in den einzelnen Zähnen dargestellt werden (Abb. 8.14). Dabei ist angenommen:

- Verteilung der Pressungen entlang der Zahnflanke sind konstant
- Gleichförmige Zähne

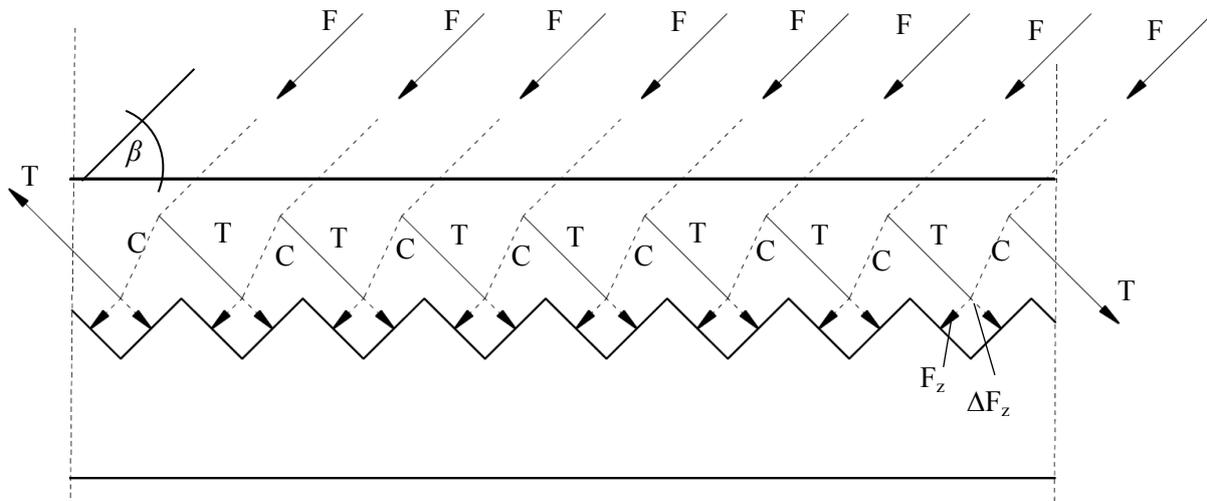


Abb. 8.14: Darstellung von ΔF_z

Die Kraftanteile F_Z und ΔF_Z werden nachfolgend an einem einfachen statischen System bestimmt. Es wird angenommen, dass sich die Kraft bei $\frac{l_f}{2}$ unter gleichem Winkel θ aufteilt (Abb. 8.15 u. 8.16).

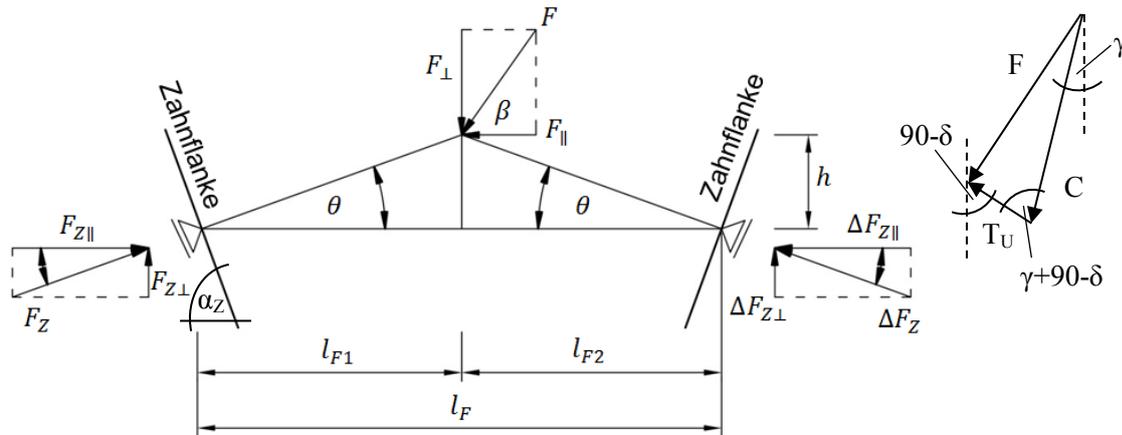


Abb. 8.15: Kraftanteile Zahnflanke

Bei mittigem Kraftangriff auf die Zahnflanke liegt der Umlenkpunkt auch mittig zwischen zwei Zähnen. Dabei ist F die Resultierende aus C und T_u , und damit die Kraft F die der Zahn erfährt.

Es gilt dann

$$l_{f1} = l_{f2} \quad (Gl. 8.4)$$

Die Auflagerkräfte werden berechnet zu

$$\Delta F_{Z\perp} = \frac{F_{\perp}}{2} - \frac{F_{\parallel} \cdot h}{l_f} \quad (Gl. 8.5)$$

$$F_{Z\perp} = \frac{F_{\perp}}{2} + \frac{F_{\parallel} \cdot h}{l_f} \quad (Gl. 8.6)$$

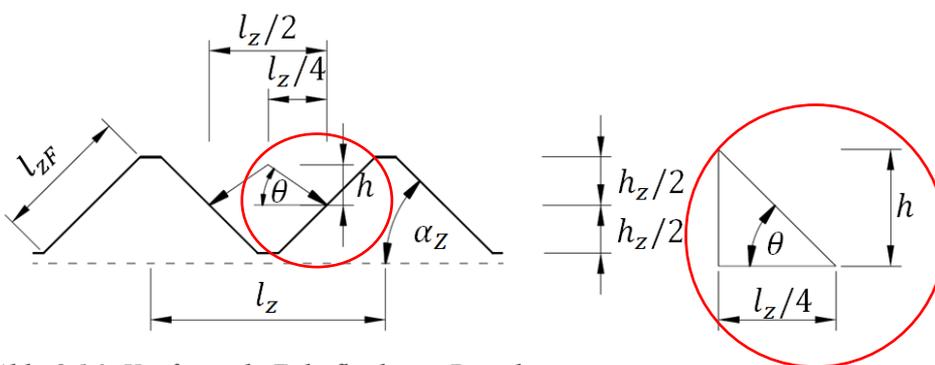


Abb. 8.16: Kraftanteile Zahnflanke im Detail

Wird die Höhe h über den Winkel θ sowie den Zahnabstand l_z ausgedrückt so ergibt sich für identische Zähne oben und unten eine konstante Belastungsverteilung an der Zahnflanke:

$$\tan \theta = \frac{h}{l_z/4} \rightarrow h = \frac{\tan \theta \cdot l_z}{4} \quad (Gl. 8.7)$$

Durch Einsetzen der Höhe h in die Vertikalkomponenten an der unteren Umlenkestelle folgt

$$\Delta F_{Z\perp} = \frac{F_{\perp}}{2} - \frac{F_{\parallel} \cdot \frac{\tan \theta \cdot l_z}{4}}{\frac{l_z}{2}} = \frac{F_{\perp}}{2} - \frac{F_{\parallel} \cdot \tan \theta \cdot l_z \cdot 2}{4 \cdot l_z} \quad (Gl. 8.8)$$

$$\Delta F_{Z\perp} = \frac{F_{\perp}}{2} - \frac{F_{\parallel} \cdot \tan \theta}{2} = \frac{1}{2}(F_{\perp} - F_{\parallel} \cdot \tan \theta) \quad (Gl. 8.9)$$

$$F_{Z\perp} = \frac{1}{2}(F_{\perp} + F_{\parallel} \cdot \tan \theta) \quad (Gl. 8.10)$$

Um die lotrechte Kraft auf die Zahnflanken zu erhalten, werden die zuvor ermittelten Kräfte auf ihre resultierende Komponente umgerechnet.

$$\sin \theta = \frac{F_{Z\perp}}{F_Z} \quad (Gl. 8.11)$$

$$\Delta F_Z = \frac{\frac{1}{2} \cdot (F_{\perp} - F_{\parallel} \cdot \tan \theta)}{\sin \theta} \quad (Gl. 8.12)$$

$$F_Z = \frac{\frac{1}{2} \cdot (F_{\perp} + F_{\parallel} \cdot \tan \theta)}{\sin \theta} \quad (Gl. 8.13)$$

Nun werden die Kraftkomponenten über die resultierende Kraft F ausgedrückt.

$$F_{\perp} = F \cdot \sin \beta \quad (Gl. 8.14)$$

$$F_{\parallel} = F \cdot \cos \beta \quad (Gl. 8.15)$$

Die Kraftanteile F_Z und ΔF_Z (Abb. 8.10) sind nun

$$\Delta F_Z = \frac{\frac{1}{2} \cdot (F \cdot \sin \beta - F \cdot \cos \beta \cdot \tan \theta)}{\sin \theta} \quad (Gl. 8.16)$$

$$F_Z = \frac{\frac{1}{2} \cdot (F \cdot \sin \beta + F \cdot \cos \beta \cdot \tan \theta)}{\sin \theta} \quad (Gl. 8.17)$$

Mit der Neigung der Zahnflanke α_z erhält man die Zahnflankenlänge l_{ZF} zu:

$$l_{ZF} = \frac{h_z}{\sin \alpha_z} \quad (Gl. 8.18)$$

Die Belastung der Zahnflanke als gemittelte Pressung berechnet sich zu:

$$p_Z = \frac{F_Z}{l_{ZF} \cdot b_z} = \frac{F_Z \cdot \sin \alpha_z}{h_z \cdot b_z} \quad (Gl. 8.19)$$

$$\Delta p_Z = \frac{\Delta F_Z}{l_{ZF} \cdot b_z} = \frac{\Delta F_Z \cdot \sin \alpha_z}{h_z \cdot b_z} \quad (Gl. 8.20)$$

mit

l_{ZF} = Länge der Zahnflanke

b_z = Breite der Zahnleiste

Wird der Umlenkwinkel θ durch α_z ausgedrückt, folgt über umformen mit $\theta = 90^\circ - \alpha_z$

$$F_Z = F \cdot \frac{\sin \beta + \cos \beta \cdot \tan(90 - \alpha_z)}{2 \cdot \sin(90 - \alpha_z)} \quad (Gl. 8.21)$$

$$\Delta F_Z = F \cdot \frac{\sin \beta - \cos \beta \cdot \tan(90 - \alpha_z)}{2 \cdot \sin(90 - \alpha_z)} \quad (Gl. 8.22)$$

$$p_Z = F \cdot \frac{\sin \beta + \cos \beta \cdot \tan(90 - \alpha_z)}{2 \cdot \sin(90 - \alpha_z)} \cdot \frac{\sin \alpha_z}{h_z \cdot b_z} \quad (Gl. 8.23)$$

$$\Delta p_Z = F \cdot \frac{\sin \beta - \cos \beta \cdot \tan(90 - \alpha_Z)}{2 \cdot \sin(90 - \alpha_Z)} \cdot \frac{\sin \alpha_Z}{h_Z \cdot b_Z} \quad (Gl. 8.24)$$

Die Belastung an der Zahnflanke ist somit von den Parametern F , β , α_Z , h_Z und b_Z abhängig. Auf die Gesamtlast F_{ges} bezogen ergeben sich damit die folgenden, in erster Näherung konstant angenommenen, Pressungen p_Z und Δp_Z entlang der Zahnflanke (Abb. 8.17).

$$p_Z = \frac{F_{ges} \cdot l_Z}{l_{ges}} \cdot \frac{\sin \beta + \cos \beta \cdot \tan(90 - \alpha_Z)}{2 \cdot \sin(90 - \alpha_Z)} \cdot \frac{\sin \alpha_Z}{h_Z \cdot b_Z} \quad (Gl. 8.25)$$

$$= \frac{F_{ges} \cdot l_Z}{l_{ges}} \cdot \frac{\sin \beta + \cos \beta \cdot \cot(\alpha_Z)}{2 \cdot \cos(\alpha_Z)} \cdot \frac{\sin \alpha_Z}{h_Z \cdot b_Z} \quad (Gl. 8.26)$$

$$= \frac{F_{ges} \cdot l_Z}{l_{ges}} \cdot \frac{\sin \beta + \cos \beta \cdot \cot(\alpha_Z)}{2} \cdot \frac{\tan \alpha_Z}{h_Z \cdot b_Z} \quad (Gl. 8.27)$$

$$\Delta p_Z = \frac{F_{ges} \cdot l_Z}{l_{ges}} \cdot \frac{\sin \beta - \cos \beta \cdot \cot(\alpha_Z)}{2} \cdot \frac{\tan \alpha_Z}{h_Z \cdot b_Z} \quad (Gl. 8.28)$$

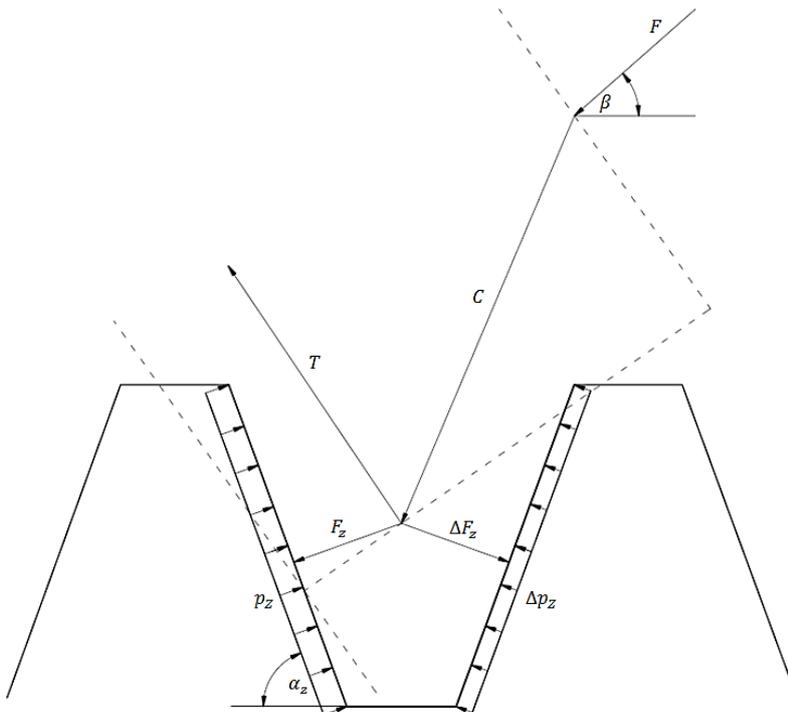


Abb. 8.17: Darstellung für den Fall $90^\circ > \beta \geq 20^\circ$

Für den Sonderfall (Abb. 8.18) einer senkrechten Belastung auf die Verzahnung, also $\beta=90^\circ$, ergibt sich:

$$p_Z = \Delta p_Z = \frac{F_{ges} \cdot l_Z}{l_{ges}} \cdot \frac{\tan \alpha_Z}{2 \cdot h_Z \cdot b_Z} \quad (Gl. 8.29)$$

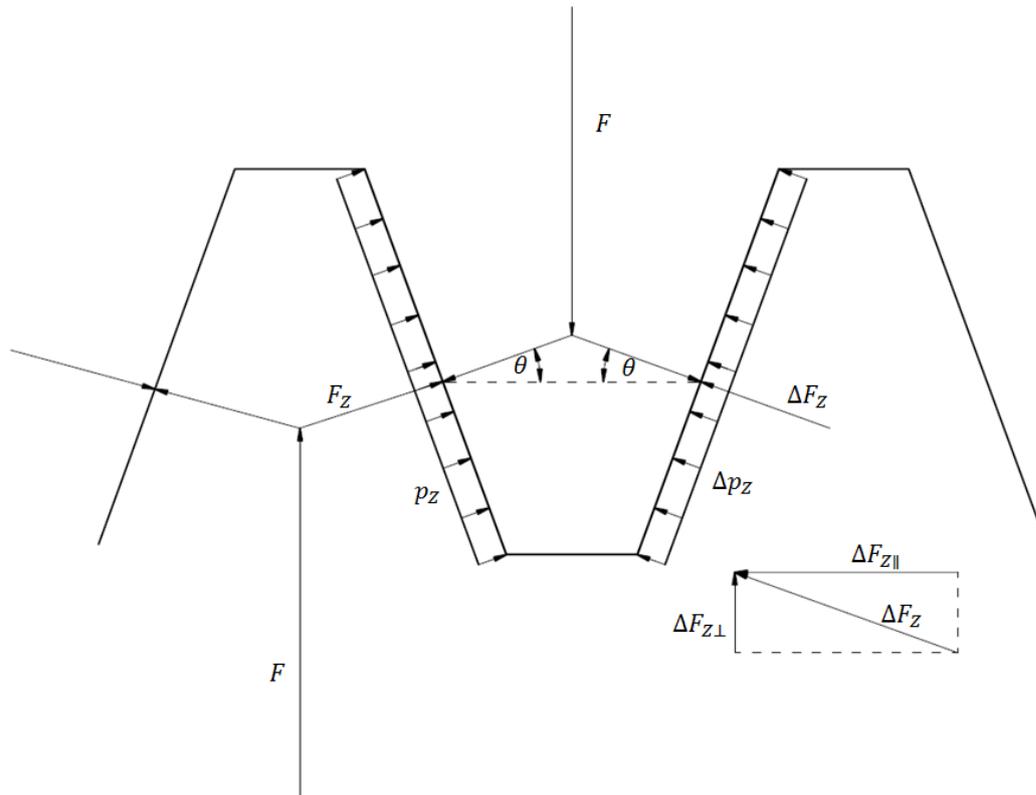


Abb. 8.18: Darstellung für den Fall $\beta = 90^\circ$ mit konstanter Flächenbelastung an der Zahnflanke

Der Kraftverlauf in der unteren Zahnleiste verläuft spiegelbildlich zur Zahnflanke, sodass im Gesamtsystem Kräftegleichgewicht herrscht.

8.2.2 Kraftfluss bei reibungsbehaftetem Kontakt

Beim reibungsbehafteten Kontakt trifft die Kraft F_z nicht, wie beim reibungsfreien Ansatz, immer senkrecht auf die Zahnflanke (Abb. 8.18), sondern unter einen Winkel $\theta_{reib.}$ (Abb. 8.19). Der Winkel $\theta_{reib.}$ kann bestimmt werden zu:

$$\begin{aligned} \theta_{reib.}(\beta) &= 90 - \alpha_z + \theta_{diff.} & (Gl. 8.30) \\ &= 90 - 70 + \arctan \mu \end{aligned}$$

Dabei zeigt der Differenzwinkel $\theta_{diff.}$ die Winkeldifferenz zwischen dem reibungsfreien Kraftneigungswinkel θ senkrecht zur Flanke und dem reibungsbehafteten Winkel $\theta_{diff.}$.

$$\begin{aligned} \theta_{diff.} &= \theta_{reib.} + \alpha_z - 90^\circ & (Gl. 8.31) \\ &\text{und} \\ \theta_{diff.} &= \arctan(\mu) \end{aligned}$$

Allgemein kann der Winkel $\theta_{diff.}$ in Abhängigkeit des Reibbeiwertes μ und des Kraftangriffs β angegeben werden (Tab. 8.4). Die analytische Berechnung der Winkelbereiche $\theta_{diff.}$ unter denen die Kraft am Zahn angreift, erfolgt in Abhängigkeit des Winkels β und des Reibbeiwertes μ . Dabei wird zunächst der minimale Winkel $\min. \theta_{diff.}$ und $\min. \theta_{reib.}$ berechnet. Kraftangriffswinkel $\beta < \min. \theta_{reib.}$ sind nicht möglich. Für $\beta = 20^\circ$ gilt $\theta_{diff.} = 0$, wobei die Kraft F_z senkrecht auf die Zahnflanke auftrifft, da die Zahnflankenneigung $\alpha_z = 70^\circ$ beträgt. Im Bereich $20^\circ < \beta \leq 90$ ergeben sich Differenzwinkel von $0 < \theta_{diff.} \leq 90 - 70 + \arctan \mu$.

Analog zu Abschnitt 8.2.1 wird an einem FE-Modell der Verlauf der Hauptspannungen bei reibungsbehafteten Kontakt untersucht. Es werden Reibbeiwerte $\mu = 0,10$ bis $0,30$ untersucht (Tab. 8.4). Es greift eine Kraft $F = 240\text{kN}$ unter einem Winkel $\beta = 45^\circ$ an.

Tab. 8.4 Winkel θ_{diff} und θ_{reib} in Abhängigkeit des Reibbeiwertes μ und des Kraftangriffs β ; $\alpha_z = 70^\circ$

μ	0,1	0,15	0,2	0,25	0,3
Max θ_{diff} = $\arctan(\mu)$ [°]	5,71	8,53	11,31	14,04	16,70
min. θ_{reib} [°]	14,3	11,5	8,7	6,0	3,3
$\beta < \min. \theta_{reib}$	nicht möglich				
$\min. \theta_{reib} \leq \beta < 20^\circ$	$14,3 < \theta_{reib.} \leq 20$	$11,5 < \theta_{reib.} \leq 20$	$8,7 < \theta_{reib.} \leq 20$	$6,0 < \theta_{reib.} \leq 20$	$3,3 < \theta_{reib.} \leq 20$
$\beta = 20^\circ$	$\theta_{diff.} = 0$				
$20^\circ < \beta \leq 90^\circ$, analytisch	$20 < \theta_{reib.} \leq 25,7$	$20 < \theta_{reib.} \leq 28,5$	$20 < \theta_{reib.} \leq 31,3$	$20 < \theta_{reib.} \leq 34,0$	$20 < \theta_{reib.} \leq 36,7$
$\beta = 45^\circ$, FEM	$\theta_{reib.} = 25,2$	$\theta_{reib.} = 27,5$	$\theta_{reib.} = 29,6$	$\theta_{reib.} = 31,8$	$\theta_{reib.} = 34,1$

Beim reibungsbehafteten Ansatz resultieren die Kräfte F_Z und ΔF_Z analog zum reibungsfreien Ansatz aus der Kraft F . Jedoch resultiert die an der Zahnflanke angreifende Kraft F_Z bzw. ΔF_Z aus einer Kraft F_N normal zur Flanke und einer Reibkraft F_R tangential zur Flanke (Abb. 8.19).

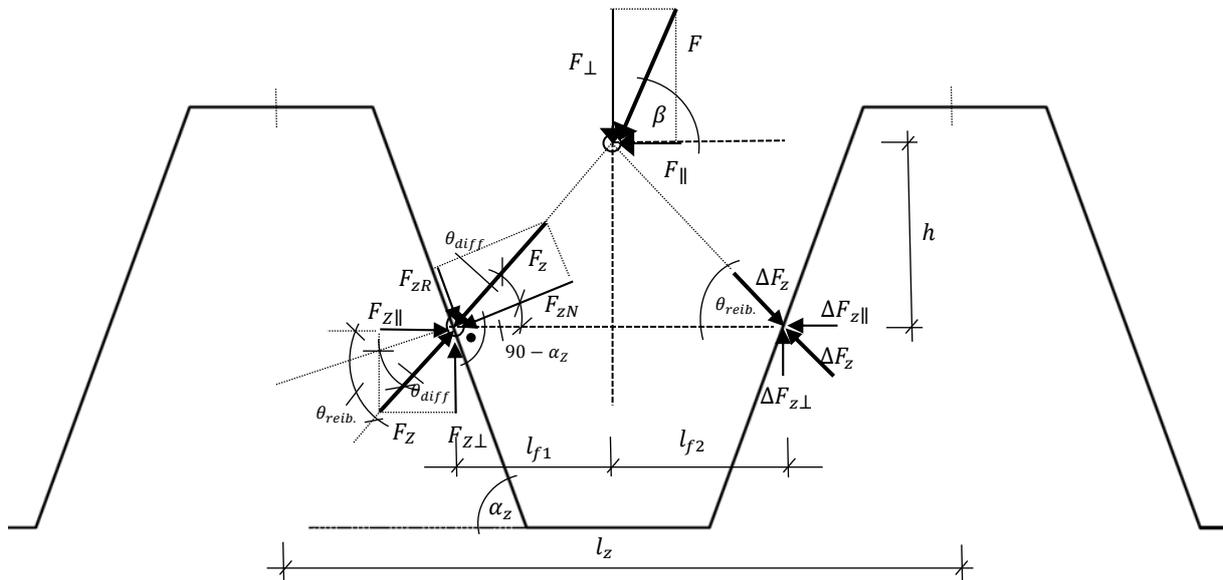


Abb. 8.19: Kräfte am Zahn bei reibungsbehafteten Kontakt

Wie beim reibungsfreien Kontakt wird die Summe aller Momente gleich Null gesetzt, damit werden die Kraft an der Zahnflanke F_Z und ΔF_Z analog zu den Gleichungen (Gl.8.5) und (Gl.8.6) berechnet. Da die Abbildung 8.11 auch für den reibungsbehafteten Kontakt gilt, können die Kräfte F_Z und ΔF_Z analog der Gleichungen (Gl.8.21) und (Gl.8.22) berechnet werden. Die Druckstrebenneigung θ wird hierbei als θ_{reib} bezeichnet.

$$\Delta F_Z = F \cdot \frac{(\sin \beta - \cos \beta \cdot \tan \theta_{reib.})}{2 \cdot \sin \theta_{reib.}} \quad (\text{Gl. 8.32})$$

$$F_Z = F \cdot \frac{(\sin \beta + \cos \beta \cdot \tan \theta_{reib.})}{2 \cdot \sin \theta_{reib.}} \quad (\text{Gl. 8.33})$$

Damit wird der Anteil der Normalkraft F_{ZN} und der Reibkraft F_{ZR} berechnet zu ($\beta \geq 20^\circ$):

$$F_{ZN} = \frac{F \cdot (\sin \beta + \cos \beta \cdot \tan \theta_{reib.}) \cdot \cos(\theta_{reib.} + \alpha_z - 90)}{2 \cdot \sin \theta_{reib.}} \quad (\text{Gl. 8.34})$$

$$F_{ZR} = \frac{F \cdot (\sin \beta + \cos \beta \cdot \tan \theta_{reib.}) \cdot \sin(\theta_{reib.} + \alpha_z - 90)}{2 \cdot \sin \theta_{reib.}} \quad (Gl. 8.35)$$

$$\Delta F_{ZN} = \frac{F \cdot (\sin \beta - \cos \beta \cdot \tan \theta_{reib.}) \cdot \cos(\theta_{reib.} + \alpha_z - 90)}{2 \cdot \sin \theta_{reib.}} \quad (Gl. 8.36)$$

$$\Delta F_{ZR} = \frac{F \cdot (\sin \beta - \cos \beta \cdot \tan \theta_{reib.}) \cdot \sin(\theta_{reib.} + \alpha_z - 90)}{2 \cdot \sin \theta_{reib.}} \quad (Gl. 8.37)$$

Aus der Normalkraft folgt die durchschnittliche konstante Pressung:

$$p_N = \frac{F_{ZN}}{l_{ZF} \cdot b_z} \quad (Gl. 8.38)$$

Und aus der Reibkraft folgt:

$$p_R = \frac{F_{ZR}}{l_{ZF} \cdot b_z} \quad (Gl. 8.39)$$

8.3 Zahnbelastung über die Länge der Zahnleiste verteilt

Für eine Berechnung nach dem elastisch-plastischen Verfahren darf die Kraft pro Zahn vereinfacht als

$$F_Z = \frac{F_{ges}}{n_{zähne}}$$

berechnet werden. Für die Berechnung elastisch-elastisch wird nachfolgend die Kraft pro Zahn F_Z abhängig von seiner Position entlang der Zahnleiste dargestellt.

8.3.1 Ansatz eines reibungsfreien Kontakt

Die ermittelten Pressungen am Zahnkontakt p_z und Δp_z werden nachfolgend genauer untersucht und ein Ingenieurmodell zur analytischen Berechnung der linear-elastischen Pressungen an der Zahnflanke entwickelt. Dazu wird von der allgemeinen Form

$$p = \frac{F_z}{l_{ZF} \cdot b_z} \quad (Gl. 8.40)$$

ausgegangen. Aus der in Kapitel 8.1 durchgeführten physikalisch linearen FE-Parameterstudie wird für die angegebenen Einflüsse je eine Belastungsverteilung über die gesamten Zähne der Zahnleiste für die Zahnflanke in Krafrichtung sowie für die Zahnflanke entgegen der Krafrichtung erstellt. Diese Belastungsverteilung wird für das Ausgangssystem prozentual über die Leiste je Zahn abgebildet (Abb. 8.20 und 8.21). Es zeigt sich ein Bereich am Anfang der Verzahnung, in dem die Belastungen ansteigen. Danach bleiben die Belastungen konstant, bevor die Belastungen zum Zahnleistenrand hin wieder fallen.

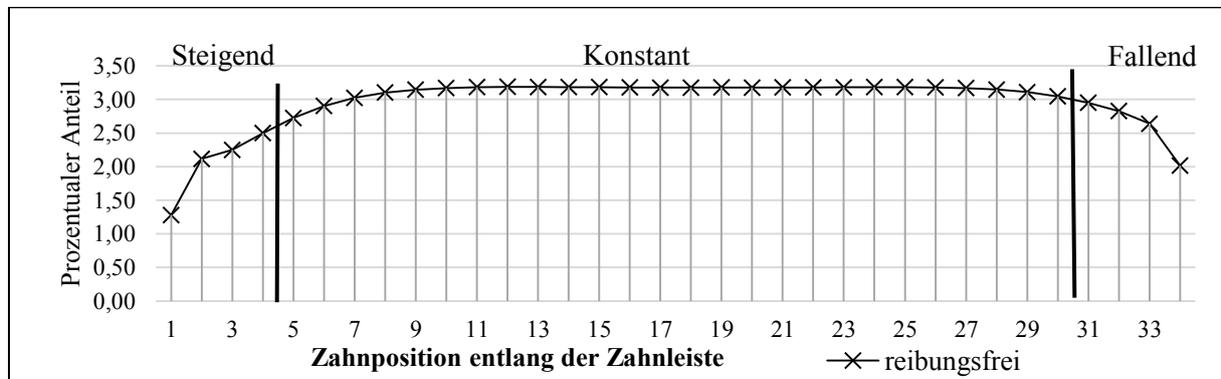


Abb. 8.20: Prozentuale Verteilung der Zahnbelastung über die Zahnanzahl der Leiste, Zahnflanke in Krafrichtung, Ausgangssystem (vgl. Tab. 8.2)

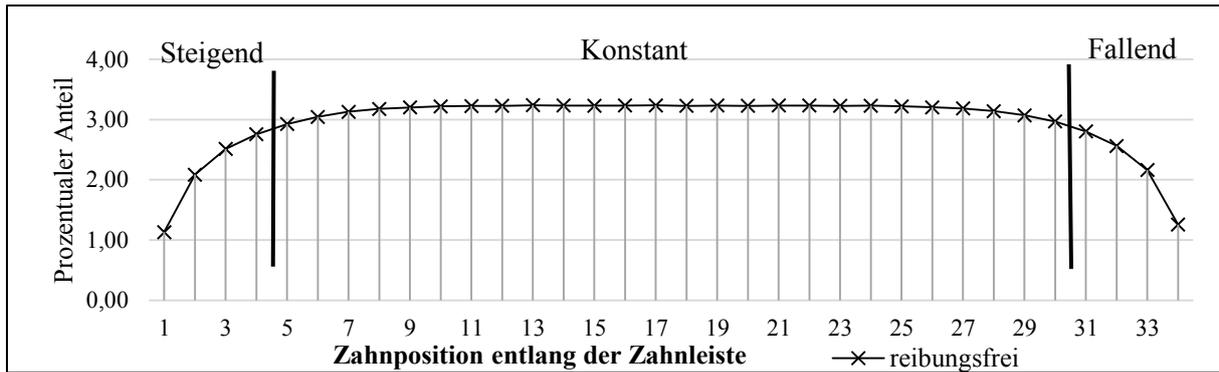


Abb. 8.21: Prozentuale Verteilung der Zahnbelastung über die Zahnanzahl der Leiste, Zahnflanke entgegen der Krafrichtung, Ausgangssystem

Der Annahme folgend, dass sich die Kräfte und die daraus resultierenden Pressungen über die Leiste prozentual gleich verhalten, wird die einwirkende Gesamtkraft F_{ges} prozentual auf die drei Bereiche steigend, konstant und fallend aufgeteilt.

Tab. 8.5: Prozentuale Belastungsverteilung k_j in Abhängigkeit der untersuchten Einflüsse (Wörner 2017) bei reibungsfreiem Kontakt

Untersuchter Einfluss	Steigender Bereich [%]		Konstanter Bereich [%]		Fallender Bereich [%]	
	In Krafr.	Entg. Krafr.	In Krafr.	Entg. Krafr.	In Krafr.	Entg. Krafr.
Ausgangssystem $l = 117,6\text{mm}$ $\beta = 45^\circ$	9	9	83	83	8	8
verringerte Zahnanzahl $l = 58,8\text{mm}$	14	14	73	74	13	12
Erhöhte Zahnanzahl $l = 176\text{mm}$	5	6	89	89	6	5
verringerte Kraft	9	9	82	82	9	9
Zahnleistenhöhe $H_1 = 30\text{mm}$	8	9	84	84	8	7
Verlängerung der Leiste über die Zähne hinaus	11	11	78	78	12	12
Lastneigung $\beta = 90^\circ$	9	10	82	82	9	8
Lastneigung $\beta = 20^\circ$	7	7	85	85	8	8
Mittelwert k_j [%]	9	9	82	82	9	9

Um die drei Bereiche steigend, konstant und fallend bei der am Zahn angreifenden Kraft F_{Zi} prozentual zu berücksichtigen, wird der Faktor k_j ($j = \text{Steigend, Konstant, Fallend}$) eingeführt. Damit ergibt sich die am einzelnen Zahn angreifende Kraft im maßgebenden konstanten Bereich zu

$$F_{Z,i} = k_j \cdot \frac{F_{ges}}{n_{Zähne}} \quad (Gl. 8.41)$$

Mit

$$k_j = \frac{\text{Mittelwert} [\%]}{100} \quad [-]$$

$n_{Zähne}$ = Anzahl der Zähne im betrachteten Bereich (steigend, konstant, fallend)

F_{ges} = Gesamtkraft auf die Zahnleiste

Die prozentuale Belastungsverteilung verhält sich auf der Zahnflanke in Krafrichtung und auf der Flanke entgegen der Krafrichtung annähernd gleich, sodass für beide Seiten im steigenden und fallenden Bereich ein Mittelwert von 9 % festgelegt werden kann (Tab. 8.5). Für den konstanten Bereich wird ein Mittelwert von 82 % angesetzt (Tab. 8.5). Der steigende und fallende Bereich wird unabhängig von den betrachteten Einflüssen auf Grundlage der FE-Studie auf jeweils vier Zähne begrenzt. Alle dazwischenliegenden Zähne werden dem konstanten Bereich zugeordnet. Es wird empfohlen, bei einer erhöhten Zahnanzahl (größer 34 Zähne) den Wert von 82 % im konstanten Bereich leicht anzuheben.

8.3.2 Ansatz eines reibungsbehafteten Kontakt

Die Modelle der untersuchten Einflüsse (Tab. 8.2) unter reibungsfreiem Kontakt werden ebenfalls mit reibungsbehafteten Kontakt abgebildet. Es wird ein Reibbeiwerte von $\mu=0,15$ angesetzt. Es zeigt sich, dass der prozentuale Belastungsverlauf über die Leiste durch die Reibung nicht beeinflusst wird (Abb. 8.22). Die Belastung nimmt an den betrachteten Punkten jedoch um etwa 15% ab, da durch die aktivierte Reibung eine Vergleichmäßigung der Belastungen in den Zähnen sowie in den angrenzenden Bereichen der Zähne eintritt.

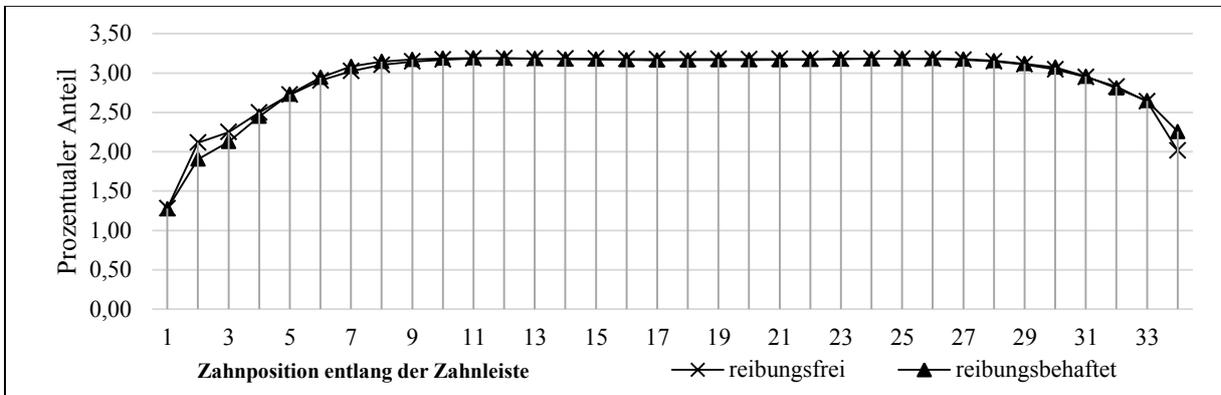


Abb. 8.22: Prozentuale Belastungsverteilung über die Zahnanzahl der Leiste, Zahnflanke in Krafrichtung, Ausgangssystem (Willacker 2018)

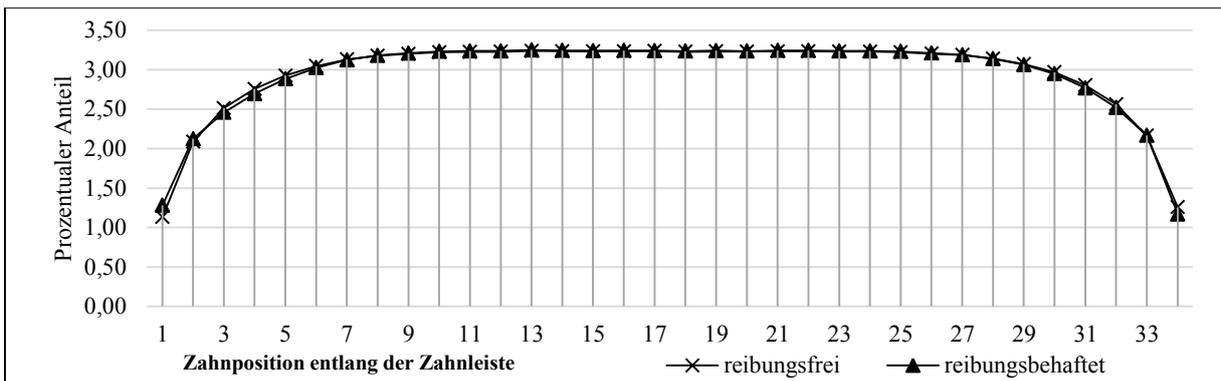


Abb. 8.23: Prozentuale Belastungsverteilung über die Zahnanzahl der Leiste, Zahnflanke entgegen der Krafrichtung, Ausgangssystem (Willacker 2018)

Tab. 8.6: Prozentuale Spannungsverteilung k_j in Abhängigkeit der untersuchten Einflüsse nach (Willacker 2018) bei reibungsbehafteten Kontakt

Untersuchter Einfluss	Steigender Bereich [%]		Konstanter Bereich [%]		Fallender Bereich [%]	
	Links	Rechts	Links	Rechts	Links	Rechts
Ausgangssystem $\beta=45^\circ$, $l = 117,6\text{mm}$	8	8	83	84	9	8
verringerte Zahnanzahl $l = 58,8\text{mm}$	13	15	75	74	12	11
Erhöhte Zahnanzahl $l = 176\text{mm}$	8	7	85	88	7	5
verringerte Kraft	9	10	83	82	8	8
Zahnleistenhöhe	8	9	84	84	8	7
Verlängerung der Leiste über die Zähne hinaus	11	11	77	77	12	12
reine Vertikallast $\beta=90^\circ$	10	11	81	81	9	8
Lastneigung $\beta=20^\circ$	7	7	86	85	7	8
Mittelwert k [%]	9	9	82	82	9	9

8.4 Belastungsverteilung entlang der Zahnflanke

8.4.1 Belastungsverteilung entlang der Zahnflanke bei reibungsfreiem Kontakt Belastungsverteilung

8.4.1.1 Betrachtung der gesamten Zahnflanke

Die Belastungsverteilung an der Zahnflanke wird in eine *Zahnflanke in Krafrichtung* und eine *Zahnflanke entgegen der Krafrichtung* unterschieden. Die Verteilung der Belastungen entlang der Zahnflanke ist bei beiden Zahnflanken ähnlich. Die in den Kapiteln 3 sowie 8.1 beschriebenen FE-Rechnungen zeigen am Flankenkopf und am Flankenfuß erhöhte Pressungen, welche sich mit Phänomenen, ähnlich die der Hertz'schen Kontakttheorie, erklären lassen. Ausgehend von diesen Ergebnissen sowie von der anfänglich in Kapitel 8.3 angenommenen konstanten Belastungsverteilung entlang der Zahnflanke können drei grundlegende Belastungsverteilungen als Näherung beschrieben werden (Abb. 8.24):

- Konstante Belastungsverteilung entlang der gesamten Zahnflanke als Grundlage der plastischen Bemessung
- Konstante Belastungsverteilung entlang von drei Teilbereichen der Zahnflanke
- Lineare Belastungsverteilung entlang von drei Teilbereichen der Zahnflanke als Grundlage der elastischen Bemessung

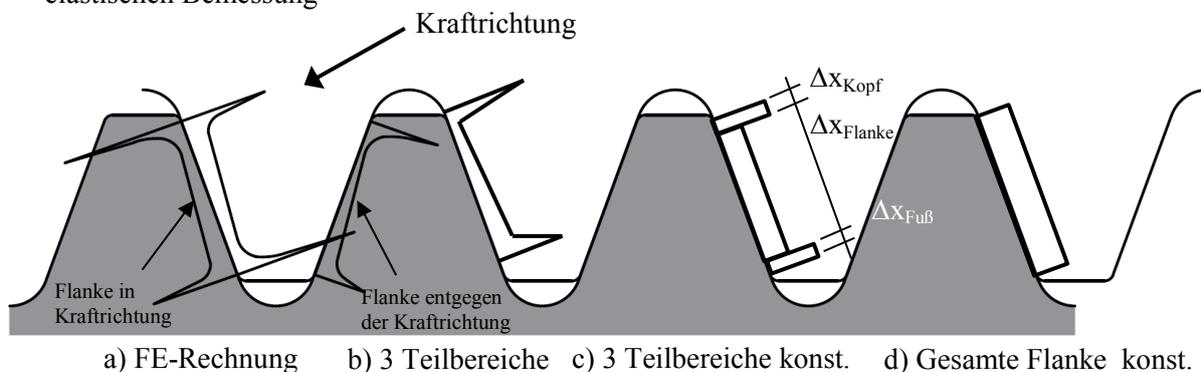


Abb. 8.24: Linear-elastische Belastungsverteilungen (links) und Vereinfachungen (rechts) an der Zahnflanke

Konstante Belastungsverteilung entlang der gesamten Zahnflanke (Abb. 8.24 d)

Die Bereiche mit erhöhten Pressungen werden als erstes plastizieren wodurch eine Umlagerung der Pressungen erfolgt. Dieser Ansatz ist für die Berechnung *elastisch-plastisch* geeignet.

$$p_{\text{Zahnflanke}} = \frac{F_z}{l_{\text{Zahnflanke}} \cdot b_z} \quad (\text{Gl. 8.42})$$

Mit

F_z nach Gl. 8.41

$l_{\text{Zahnflanke}}$ = gesamte Zahnflankenlänge 2,14mm

b_z = Breite der Zahnleiste

Konstante Belastungsverteilung entlang von drei Teilbereichen der Zahnflanke (Abb. 8.24 c)

Um insbesondere bei elastischen Berechnungen die Pressungen ähnlich der Hertz'schen Pressungen ausreichend zu berücksichtigen, kann die Zahnflanke in die drei Bereiche Zahnkopf, Flanke und Zahnfuß eingeteilt werden. Für jeden Bereich wird die durchschnittliche Pressung berechnet. In FE-Rechnungen wird für jeden untersuchten Einfluss ein Belastungsverlauf an einer exemplarischen Zahnflanke (Abb. 8.25) für jeden der Teilbereiche (steigend, konstant, fallend) betrachtet. Für das Ausgangssystem wird der Belastungsverlauf über die gesamte Flanke einer Zahnflanke in Lastrichtung (Abb. 8.26) im konstanten Bereich exemplarisch dargestellt (Abb. 8.27). Der Belastungsverlauf kann auch hier prozentual ausgewertet werden. Die Mittelwerte der Flankenkräfte F_{z_i} in den Teilbereichen Kopf, Flanke und Fuß liegen für den Flankenkopf bei 15%, bei der Flanke bei 67% und beim Zahnfuß bei 18% (vgl. Anhang E) der Gesamtflankenkraft. Diese prozentuale Verteilung wird mit dem Faktor $k_{i(i = \text{Kopf, Flanke, Fuß})}$ berücksichtigt.

$$p_{\text{Kopf}} = \frac{k_{\text{Kopf}} \cdot F_Z}{\Delta x_{\text{Kopf}} \cdot b_Z} \quad (\text{Gl. 8.43})$$

$$p_{\text{Flanke}} = \frac{k_{\text{Flanke}} \cdot F_Z}{\Delta x_{\text{Flanke}} \cdot b_Z} \quad (\text{Gl. 8.44})$$

$$p_{\text{Fuß}} = \frac{k_{\text{Fuß}} \cdot F_Z}{\Delta x_{\text{Fuß}} \cdot b_Z} \quad (\text{Gl. 8.45})$$

Mit

Belastungsanteil je Bereich k_{Kopf} , k_{Flanke} , $k_{\text{Fuß}}$ nach Anhang E

F_Z nach Gl. 8.38

Δx_{Kopf} , Δx_{Flanke} , $\Delta x_{\text{Fuß}}$ = Abschnitte der Flankenlänge (kann aus Erfahrungswerten aufgrund der FE-Studien angesetzt werden mit $\Delta x_{\text{Kopf}} = 0,20\text{mm}$; $\Delta x_{\text{Flanke}} = 1,60\text{mm}$; $\Delta x_{\text{Fuß}} = 0,34\text{mm}$)

b_Z = Breite der Zahnleiste

Lineare Belastungsverteilung entlang von drei Teilbereichen der Zahnflanke (Abb. 8.24 b)

Abbildung der trapezförmigen Teilbereiche und Betrachtung der Pressungen

Neben den genannten Beschreibungen soll nachfolgend der Verlauf der Belastungen entlang der Zahnflanke durch drei Teilbereiche mit jeweils linearem Verlauf beschrieben werden (Abb. 8.26 u. 8.27). Jeden der Teilbereich wird eine Kraft $F_{Zi} = k_i \cdot F_Z$ zugeordnet. Die an der Zahnflanke angegebenen Belastungen haben am Flankenkopf den Nullpunkt (Abb. 8.25).

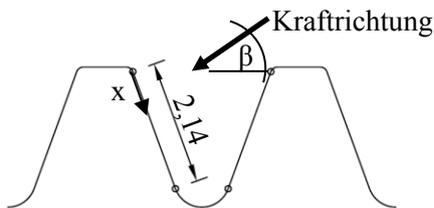


Abb. 8.25: Zahnflanke mit Lage des Nullpunktes für die Verläufe der Pressungen

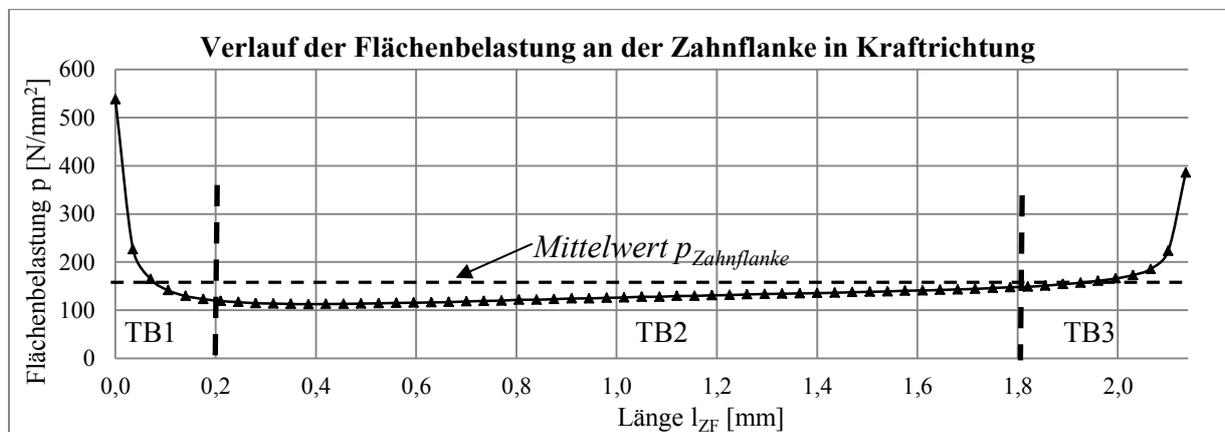


Abb. 8.26: Verlauf der Flächenbelastung über die gesamte Flanke einer Zahnflanke in Lastrichtung am Ausgangssystem im Bereich der konstanten Belastungsverteilung nach (Wörner 2017)

Die Pressungen aus der FE-Rechnung werden entlang der Zahnflanke an mehreren Messstellen abgelesen. Wird der Verlauf (die Funktion) dieser Messpunkte integriert, erhält man die am Zahn angreifende Kraft F_Z .

$$F_Z = b_Z \cdot \int_0^{l_{ZF}} p_Z(x) \cdot dx \quad (\text{Gl. 8.46})$$

Demzufolge kann die durchschnittliche Pressung im Teilbereich Δx_i an der Zahnflanke ausgedrückt werden zu:

$$p_i = \frac{F_{Zi}}{\Delta x_i \cdot b_Z} = \int_{x_i}^{x_{i+1}} p_{i,(x)} \cdot dx \cdot \frac{1}{x_{i+1} - x_i} \quad (\text{Gl. 8.47})$$

Vereinfacht wird für jeden Teilbereich eine trapezförmige Belastungsverteilung angenommen (Abb. 8.27). Damit kann die Kraft je Teilbereich $F_{z,i}$ beschrieben werden zu:

$$F_{z,i} = b_z \cdot \int_{x_i}^{x_{i+1}} p_{i,(x)} \cdot dx = p_i \cdot x \cdot b_z + \frac{1}{2} \cdot (p_{i+1} - p_i) \cdot x \cdot b_z \quad (\text{Gl. 8.48})$$

Die Spannungswerte p_i und p_{i+1} stehen über das Steigungsverhältnis m der Geradengleichung miteinander in Beziehung (Abb. 8.27).

$$p_{i(x)} = p_i + m_i \cdot \Delta x \quad (\text{Gl. 8.49})$$

Die Steigung m ist dabei

$$m = \frac{p_{i+1} - p_i}{\Delta x_i} \quad (\text{Gl. 8.50})$$

und die Pressung p_i am Rand des Teilbereichs

$$p_i = \frac{F_{z,i}}{\Delta x_i \cdot b_z} - \frac{1}{2} \cdot m \cdot \Delta x_i \quad (\text{Gl. 8.51})$$

Die Steigung m ist anhand von FE-Studien aus den Tabellen in Anhang E zu entnehmen.

In einem weiteren Schritt soll die Steigung m für den Bereich der Flanke in Abhängigkeit des Kraftneigungswinkels β und der Kraft F_{ges} beschrieben werden.

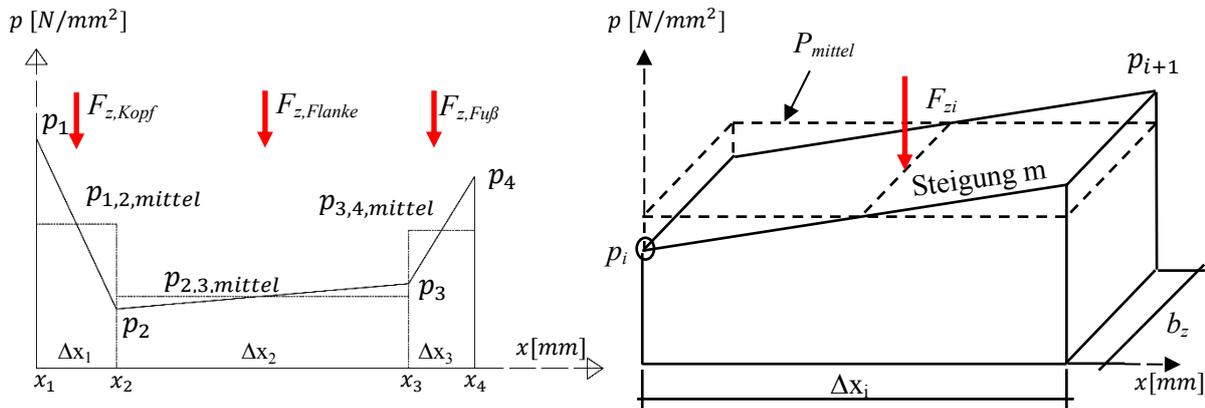


Abb. 8.27: Darstellung des trapezförmigen Belastungsverlaufs an der Zahnflanke und Angabe der durchschnittlichen Pressungen je Bereich (links); exemplarische Pressung eines Teilbereichs (rechts)

Erweiterung der Pressungsbetrachtung durch die Abhängigkeiten vom Kraftneigungswinkel β und der Kraft F_{ges} .

Erkenntnisse aus FE-Studien:

Die FE-Berechnungen zeigen, dass die Steigung m mit zunehmender Kraft F_{ges} sowie mit kleiner werdendem Kraftneigungswinkel β in allen drei Bereichen (Flankenkopf, Flanke, Flankenfuß) ansteigt (Abb. 8.28 u. 8.29). Deshalb wird in einem weiteren Schritt eine Steigungsformel in Abhängigkeit der Kraft F_{ges} und des Neigungswinkels β definiert. Dazu werden die Ergebnisse der FE-Studie mit den Parametern aus Tab. 8.2 verwendet. Es wird die Kraft F_{ges} in 10 gleichen Laststufen von je 20kN zwischen $F_{\parallel} = F_{\perp} = 20\text{kN}$ bis 200kN variiert und unter 45° auf das System aufgegeben. Es wird die Belastungsverteilung über die Zahnflanke in Krafrichtung sowie die Zahnflanke entgegen der Krafrichtung in Abhängigkeit der Kraft F_{ges} für den konstanten Bereich dargestellt (Abb. 8.28 u. 8.29).

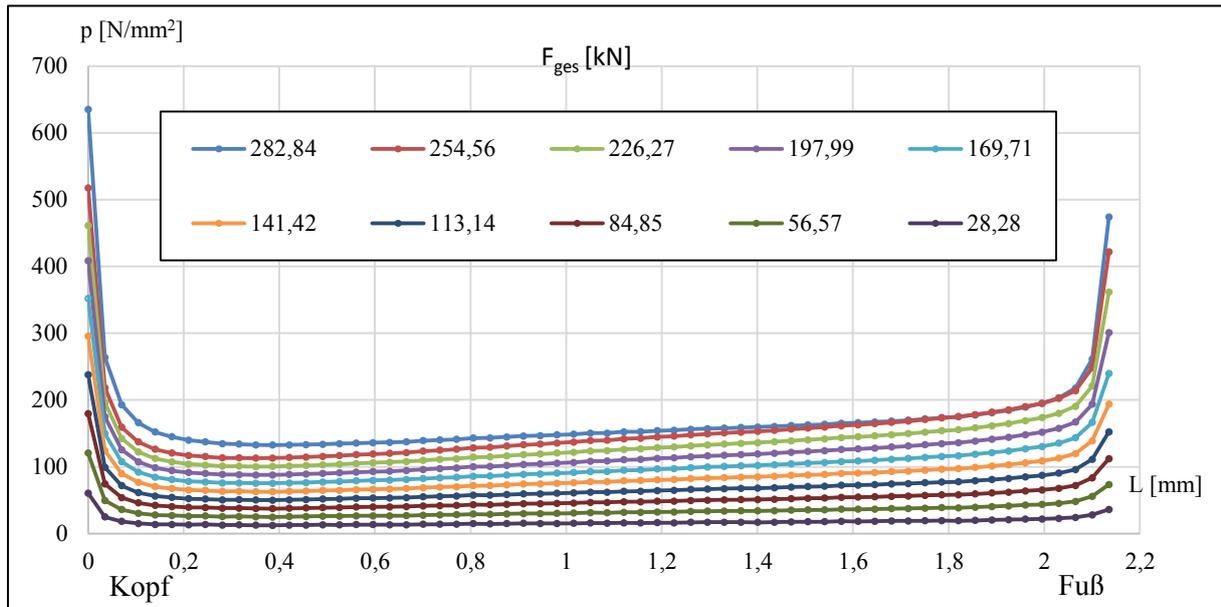


Abb. 8.28: Belastungsverteilung entlang der Zahnflanke in Krafrichtung in Abhängigkeit der Kraft F_{ges} für den Bereich mit konstanter Belastungsverteilung, $\beta=45^\circ$ (Wörner 2017)

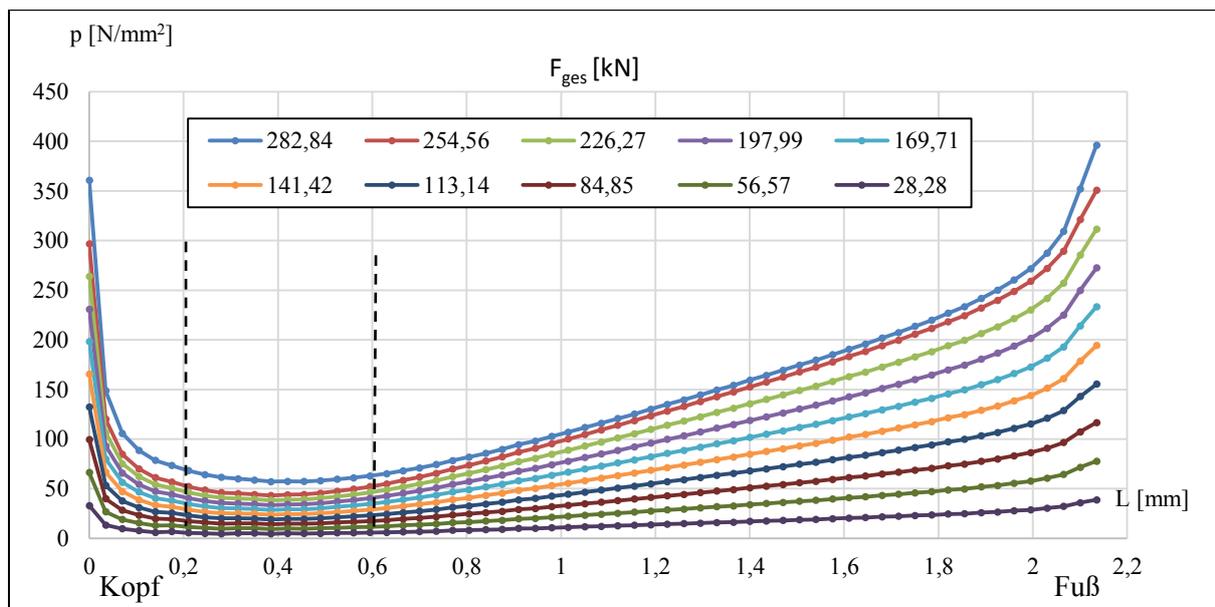


Abb. 8.29: Belastungsverteilung entlang der Zahnflanke entgegen der Krafrichtung in Abhängigkeit der Kraft F_{ges} für den Bereich mit konstanter Belastungsverteilung, $\beta=45^\circ$ (Wörner 2017)

Je größer die Kraft F_{ges} wird, desto größer ist die Steigung m der Belastungsverteilung (Abb. 8.28 und 8.29). Am Zahnkontakt entgegen der Krafrichtung tritt dies deutlicher hervor als am Zahnkontakt in Krafrichtung. Am Zahnkontakt entgegen der Krafrichtung zwischen etwa 0,2 und 0,6 mm befindet sich das Pressungsminimum der Kurve, bei dem der Verlauf der Pressungen näherungsweise horizontal verläuft (Abb. 8.29).

Ferner wird der Kraftneigungswinkel β in 10° -Schritten zwischen 30° und 90° variiert. Die Last wird dabei mit $F_{ges} = 150\text{kN}$ beibehalten. Mit flacher werdenden Kraftneigungswinkel β steigen die Pressungen an der Zahnausrundung an (Abb. 8.30 u. 8.31). Durch den größer werdenden Anteil der Horizontallast kommt es im Zahnfuß zu erhöhter Pressungskonzentration. Am Zahnkopf hingegen nehmen die Bereiche mit dem Phänomen der Hertz'schen Pressungen ab.

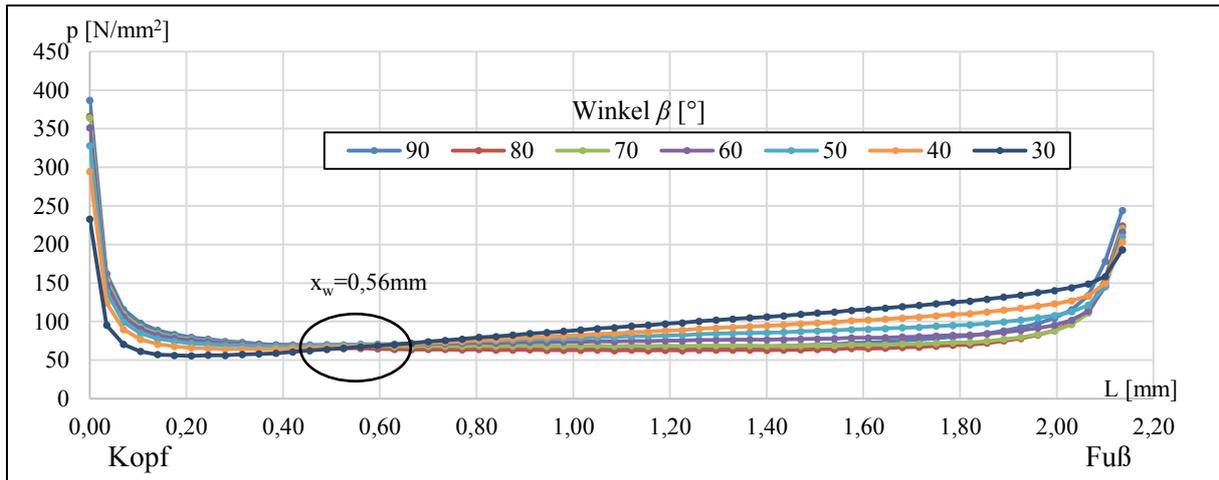


Abb. 8.30: Belastungsverteilung entlang der Zahnflanke in Krafrichtung in Abhängigkeit der Kraftneigung β für den Bereich mit konstanter Belastungsverteilung (Wörner 2017)

Jeder Zahnkontakt hat eine Stelle x_w , an der alle Belastungsgraphen ähnliche Pressungen aufweisen. Demnach sind die Pressung und die Steigung m der Pressung an dieser Stelle nur abhängig von der Kraft F_{ges} und nicht vom Kraftneigungswinkel β . Für jeden Winkel wird in einer FE-Rechnung der Belastungsverlauf am Zahnkontakt berechnet und mit einer Trendkurve die Steigung m ermittelt (Tab. 8.7).

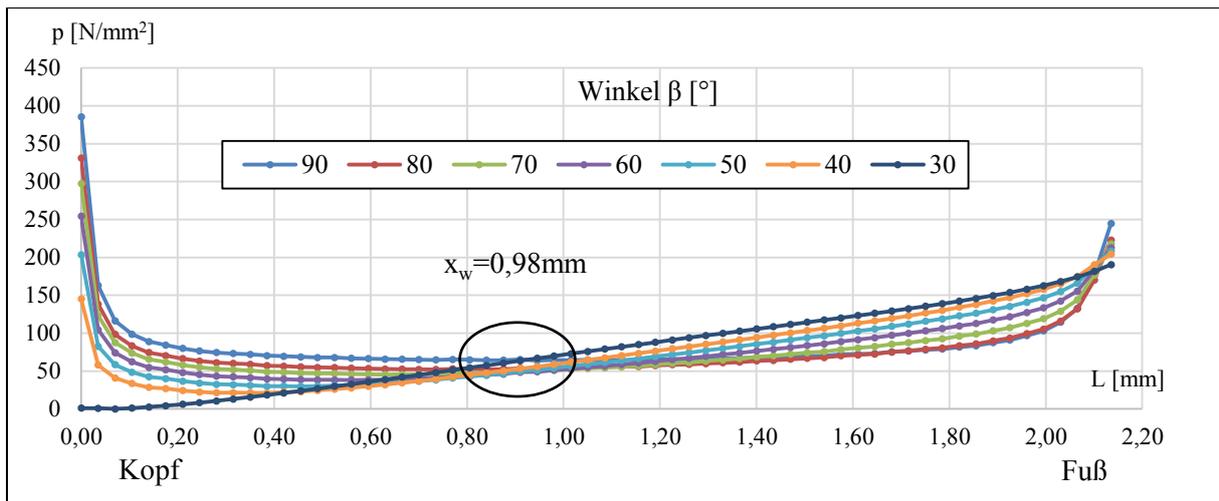


Abb. 8.31: Belastungsverteilung entlang der Zahnflanke entgegen der Krafrichtung in Abhängigkeit der Kraftneigung β für den Bereich mit konstanter Belastung (Wörner 2017)

Tab. 8.7: Steigungen m an der Flanke in Krafrichtung für den Bereich mit konstanter Belastungsverteilung (Wörner 2017)

Steigung m in Abhängigkeit des Winkels β							
Winkel β	90°	80°	70°	60°	50°	40°	30°
Steigung m an der Flanke [N/mm ³]	6,20	0,44	1,31	7,87	18,27	30,93	46,15

8.4.1.2 Betrachtung des mittleren Bereichs der Zahnflanke Δx_2

Im Folgenden wird der mittlere Bereich der Zahnflanke Δx_2 genauer betrachtet und aufbauend aus den Erkenntnissen aus Kapitel 8.4.1.1 ein analytischer Berechnungsansatz für dessen Bereich entwickelt.

Berechnung der Steigung m im mittleren Bereich der Zahnflanke sowie der Pressung in Abhängigkeit des Winkels β :

Die Steigung m im Mittelbereich der Zahnflanke zeigt in Abhängigkeit des Winkels β ein quadratisches Verhältnis in Form einer Parabel (Abb. 8.32).

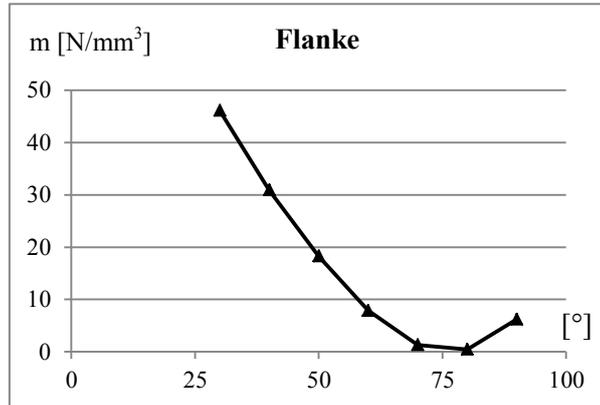


Abb. 8.32: Steigung m in Abhängigkeit des Winkels β nach (Wörner 2017) für den reibungsfreien Ansatz für die Flanke

Damit kann die Steigung m in Abhängigkeit des Winkels β mit einer Funktion 2. Grades abgebildet werden.

$$m(\beta) = a \cdot \beta^2 + b \cdot \beta + c \quad (\text{Gl. 8.52})$$

Die unbekanntenen Koeffizienten a , b und c werden mittels quadratischer Regression bestimmt (Tab. 8.8). Dazu soll die Summe der Quadrate aus den Differenzen der tatsächlichen Werte $m_{\text{tats.}}$ und der berechneten Werte $m_{\text{ber.}}$ ein Minimum bilden. Es wird die Funktion $f(a,b,c)$ eingeführt.

$$f(a, b, c) = \sum_{i=1}^n (m_{i,\text{tats.}} - m_{i,\text{ber.}})^2 = \sum_{i=1}^n (m_i - a \cdot \beta_i^2 - b \cdot \beta_i - c)^2 \quad (\text{Gl. 8.53})$$

Hierfür werden die partiellen Ableitungen $\frac{\partial f}{\partial a}$ und $\frac{\partial f}{\partial b}$ und $\frac{\partial f}{\partial c}$ zu Null gesetzt.

Es folgt:

$$\frac{\partial f}{\partial a} = 2 \cdot \sum_{i=1}^n (m_i - a \cdot \beta_i^2 - b \cdot \beta_i - c) \cdot (-\beta_i^2) = 0 \quad (\text{Gl. 8.54})$$

$$\frac{\partial f}{\partial b} = 2 \cdot \sum_{i=1}^n (m_i - a \cdot \beta_i^2 - b \cdot \beta_i - c) \cdot (-\beta_i) = 0 \quad (\text{Gl. 8.55})$$

$$\frac{\partial f}{\partial c} = 2 \cdot \sum_{i=1}^n (m_i - a \cdot \beta_i^2 - b \cdot \beta_i - c) \cdot (-1) = 0 \quad (\text{Gl. 8.56})$$

Der Faktor 2 kann entfallen, da die Gleichung immer Null ergeben muss. Mit einer Division durch n folgen die Mittelwerte zu:

$$\overline{m_i \beta_i^2} = a \cdot \overline{\beta_i^4} + b \cdot \overline{\beta_i^3} + c \cdot \overline{\beta_i^2} \quad (\text{Gl. 8.57})$$

$$\overline{m_i \beta_i} = a \cdot \overline{\beta_i^3} + b \cdot \overline{\beta_i^2} + c \cdot \overline{\beta_i} \quad (\text{Gl. 8.58})$$

$$\overline{m_i} = a \cdot \overline{\beta_i^2} + b \cdot \overline{\beta_i} + c \quad (\text{Gl. 8.59})$$

Das lineare Gleichungssystem mit den drei Variablen a, b und c liefert die Lösung:

$$a = \frac{(\overline{m_i \beta_i^2} - \overline{m_i} \cdot \overline{\beta_i^2}) \cdot (\overline{\beta_i^2} - (\overline{\beta_i})^2) - (\overline{m_i \beta_i} - \overline{m_i} \cdot \overline{\beta_i}) \cdot (\overline{\beta_i^3} - \overline{\beta_i} \cdot \overline{\beta_i^2})}{(\overline{\beta_i^4} - (\overline{\beta_i^2})^2) \cdot (\overline{\beta_i^2} - (\overline{\beta_i})^2) - (\overline{\beta_i^3} - \overline{\beta_i} \cdot \overline{\beta_i^2})^2} \quad (Gl. 8.60)$$

$$b = \frac{(\overline{m_i \beta_i} - \overline{m_i} \cdot \overline{\beta_i}) - a \cdot (\overline{\beta_i^3} - \overline{\beta_i} \cdot \overline{\beta_i^2})}{\overline{\beta_i^2} - (\overline{\beta_i})^2} \quad (Gl. 8.61)$$

$$c = \overline{\beta_i} - a \cdot \overline{\beta_i^2} - b \cdot \overline{\beta_i} \quad (Gl. 8.62)$$

Tab. 8.8: Ergebnisse der Polynomregression zur Darstellung des Steigungsverhältnisses (Wörner 2017)

Ergebnisse der quadratischen Regression			
Koeffizient	a	b	c
Flanke	0,020	-3,157	123,598

Mit den Werten a, b und c aus der Polynomregression kann nach Gleichung (Gl. 8.49) die Steigung m im Mittelbereich der Zahnflanke in Abhängigkeit eines Winkels β berechnet werden.

Die Pressung wird infolge des Kraftneigungswinkel β beschrieben zu:

$$p_\beta(x) = m_\beta \cdot x + p_i \quad (Gl. 8.63)$$

Mit

m_β nach Gl. 8.52

x = Stelle, an der die Pressung berechnet wird

$$p_2 = p_{x_w} - m_\beta \cdot x_w \quad (Gl. 8.64)$$

P_2 : Pressung am Übergang von Kopf- zum Flankenbereich (Pressung am Anfang des mittleren Flankenbereichs)

p_{x_w} vgl. Gl. 8.65

Betrachtung der Pressung in Abhängigkeit der Kraft:

Um an der Stelle x die Pressung zu bestimmen, wird die Pressung p_{x_w} am Punkt x_w benötigt. (vgl. Abb. 8.30, 8.31). p_{x_w} wird in Abhängigkeit von der Last F_{zi} im Mittelbereich der Zahnflanke bestimmt. Dazu wird die Kraft variiert, die an der Stelle x_w unabhängig von der Kraftneigung β ist. Die Entwicklung der Pressungen am Zahnkontakt in Krafrichtung am Punkt $x_w=0,56\text{mm}$ in Abhängigkeit der Kraft F_{zi} verläuft linear (Abb. 8.33).

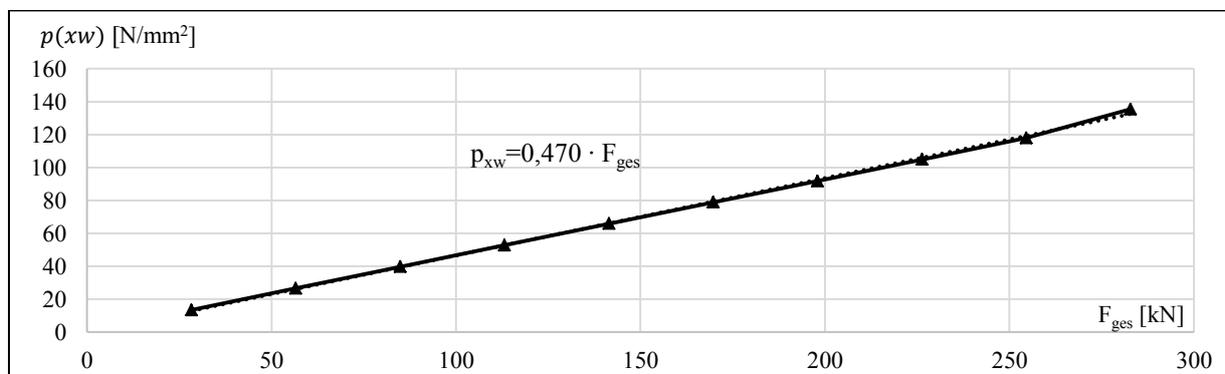


Abb. 8.33: Studie zur Spannungsentwicklung an der Stelle $x_w=0,56\text{mm}$ in Abhängigkeit der Kraft F_{Res} (Wörner 2017)

Die Pressungen werden in Abhängigkeit der Kraft als Geradenfunktion $p_{x_w}(F_{zi})$ beschrieben:

$$p_{x_w}(F_{zi}) = 0,470 \cdot F_{ges} \quad (Gl. 8.65)$$

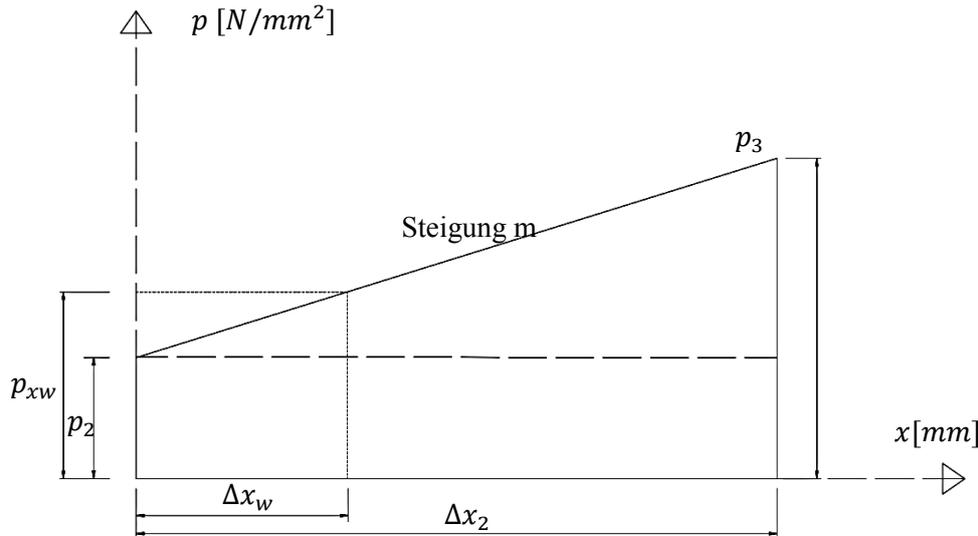


Abb. 8.34: Exemplarische Darstellung zum Verlauf der Pressungen im Teilbereich

Betrachtung der Pressungen in Abhängigkeit des Winkels β und der Kraft:

Allgemein wird die Spannung im mittleren Bereich der Zahnflanke unter dem Einfluss des Kraftneigungswinkels β und der Kraft F_{zi} sowie der Zahnleistenbreite berechnet. Aus Gleichung (Gl. 8.64) in Gleichung (Gl. 8.63) folgt die Pressung im mittleren Bereich der Zahnflanke zu:

$$p(x) = m_{\beta} \cdot x + (p_{x_w} - m_{\beta} \cdot x_w) = p_{x_w} + m_{\beta} \cdot (x - x_w) \quad (\text{Gl. 8.66})$$

Mit Gleichung (Gl. 8.65) wird daraus

$$p(x) = 0,470 \cdot F_{zi} + m_{\beta} \cdot (x - x_w) \quad (\text{Gl. 8.67})$$

$$p(x) = 0,470 \cdot F_{zi} + (a \cdot \beta^2 + b \cdot \beta + c) \cdot (x - x_w) \quad (\text{Gl. 8.68})$$

Mit

Koeffizienten a, b, c nach Tab. 8.8

Kraftneigungswinkel β [°]

Steigung $m_{\beta} = 0,470$ [N/mm³]

Gesamtkraft F_{zi} [N]

x_i = Anfang des betrachteten Trapez der Flanke

x_{i+1} = Ende des betrachteten Trapez der Flanke

x = Stelle zwischen x_i und x_{i+1} , an der die Pressung berechnet wird

$x_w = 0,56$ mm Abstand von x_i in Richtung x_{i+1}

Mit Gleichung (Gl. 8.68) kann im Bereich der Flanke (Abb. 8.34) die Pressung an jeder beliebigen Stelle x berechnet werden. Ausgehend von der Flanke werden die angrenzenden Teilbereiche „Zahnkopf“ und „Zahnfuß“ durch Geraden nach Gl. 8.69 und 8.70 beschrieben. Die Gleichung (Gl. 8.68) liefert an der Stelle $p(x_2)$ die Pressung für den Übergang von der Flanke zum Flankenkopf und an der Stelle $p(x_3)$ den Übergang zum Flankenfuß. Mit den Steigungen m dieser Bereiche (vgl. Tab. 8.9) kann ebenfalls am Flankenkopf und -fuß die Pressung an jeder beliebigen Stelle berechnet werden.

$$p_{Kopf} = (m_{Kopf} \cdot (x_2 - x)) + p(x_2) \quad (\text{Gl. 8.69})$$

$$p_{Fuß} = (m_{Fuß} \cdot (x - x_3)) + p(x_3) \quad (\text{Gl. 8.70})$$

Tab. 8.9: Steigungen m für die Bereiche Flankenkopf und Flankenfuß

Steigung m [N/mm ³] in Abhängigkeit der Kraft F für Winkels $30 \leq \beta \leq 90$		
Kraft	Flankenkopf	Flankenfuß
1,0 kN/cm Zahn	-1300	800
6,0 kN/cm Zahn	-7000	5000
10,0 kN/cm Zahn	-11000	9000

Diskussion zum Pressungsverlauf:

Der grundsätzliche Pressungsverlauf aus der linear-elastischen FE-Analyse wird durch die beiden linear-elastischen Ansätze „lineare Teilbereiche“ und „konstante Teilbereiche“ gut angenähert (Abb. 8.35 u. 8.36). Die Berechnungsansätze liefern bei einer Integration der Pressungen immer die gleiche Kraft in den Teilbereichen bzw. der gesamten Zahnflanke. Der in dieser Arbeit beschriebene Verlauf der Pressungen am Zahnkontakt im linear-elastischen Zustand zeigt die grundsätzlichen Einflüsse des Kraftneigungswinkels β und der Größe der Kraft F_Z . Weiterhin werden aufgrund dieser Betrachtungen folgende Aussagen getroffen:

- Für linear-elastische Berechnungen ist die Betrachtung der Teilbereiche mit konstanter Belastungsverteilung ausreichend genau.
- Aufgrund der kleinen Kontaktbereiche des Flankenkopfs und des Flankenfuß kann bei linear-elastischen Berechnungen das Phänomen der Hertz'schen Pressungen berücksichtigt werden. Diese Pressungen werden den ertragbaren Pressungen (Tab. 3.7) gegenübergestellt.

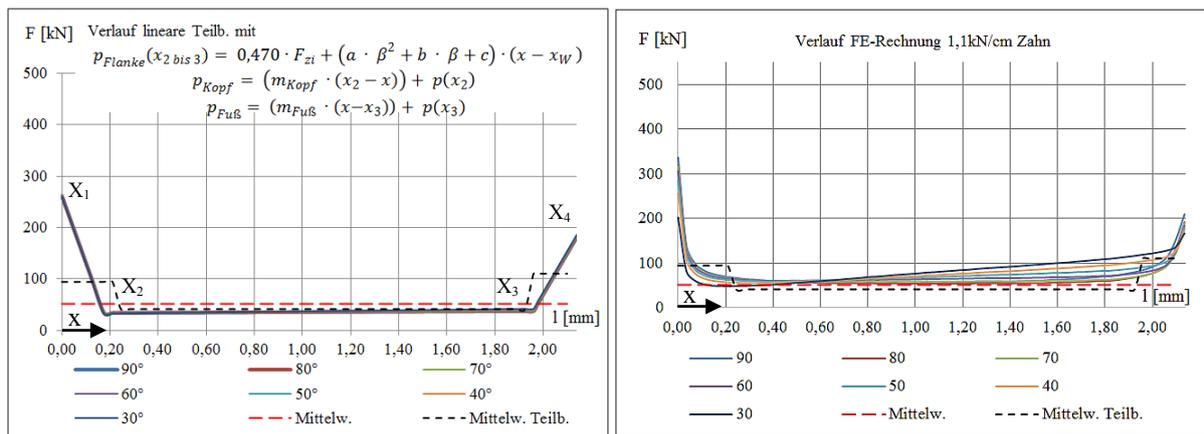


Abb. 8.35: Pressungen an der Flanke bei Belastung 1,1 kN/cm Zahn, analytischer Ansatz links und FE-Rechnung rechts

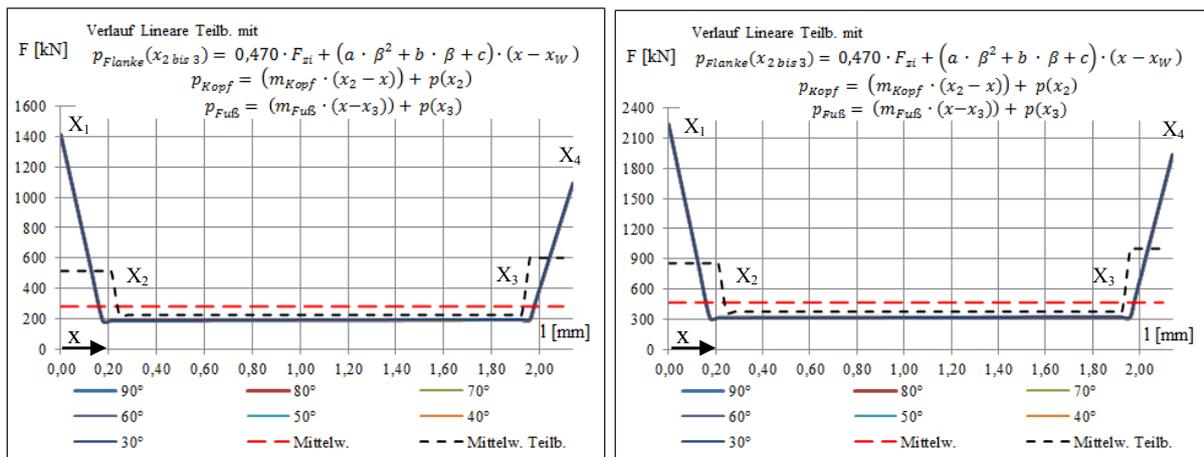


Abb. 8.36: Analytische Berechnung der Pressungen an der Flanke bei Belastung 6,0 kN/cm Zahn (links) und 10,0 kN/cm Zahn (rechts)

8.4.2 Belastungen am Zahnkontakt bei reibungsbehafteten Kontakt

Die Belastungsverteilung am Zahnkontakt verhält sich beim Ansatz der Reibung ähnlich wie beim Ansatz ohne Reibung. Jedoch zeigen sich auch hier die geringeren Pressungen. Pressungsspitzen werden durch den Anteil aus Reibung vergleichmäßigt. Demnach lassen sich auch bei einem reibungsbehafteten Kontakt die Abschnitte Flankenkopf, Zahnflanke und Flankenfuß festlegen. Die Steigungen m dieser Bereiche sind in der Regel geringer als jene beim reibungsfreien Kontakt. Am linken Zahnkontakt zeigt sich ein s-förmiger Belastungsverlauf in der Zahnflanke (Abb. 8.37).

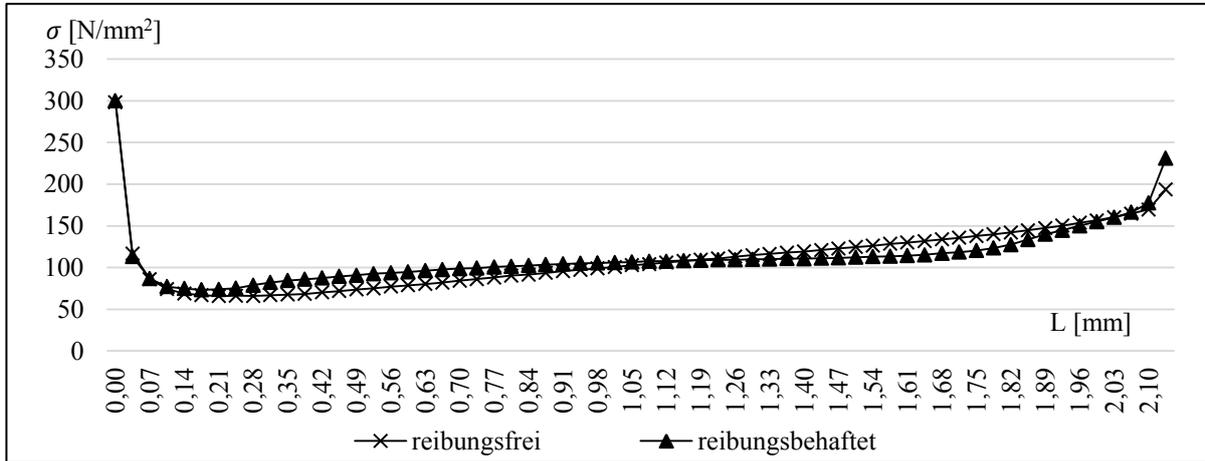


Abb. 8.37: Gegenüberstellung der Spannungsverläufe an der Zahnflanke in Krafrichtung für reibungsfreien und reibungsbehafteten Kontakt (Willacker 2018)

Die analytische Beschreibung der Pressungen erfolgt wie beim reibungsfreien Kontakt.

Tab. 8.10: Steigungen m an der Flanke in Krafrichtung für den konstanten Bereich (Willacker 2018)

Steigung m in Abhängigkeit des Winkels β							
Winkel β	90°	80°	70°	60°	50°	40°	30°
Steigung m an der Flanke [N/mm ³]	8,46	1,87	-0,14	2,59	8,88	15,98	25,76

Die Steigung m zeigt in Abhängigkeit des Winkels β ebenfalls ein quadratisches Verhältnis in Form einer Parabel (Abb. 8.38) gemäß Gleichung (Gl. 8.41).

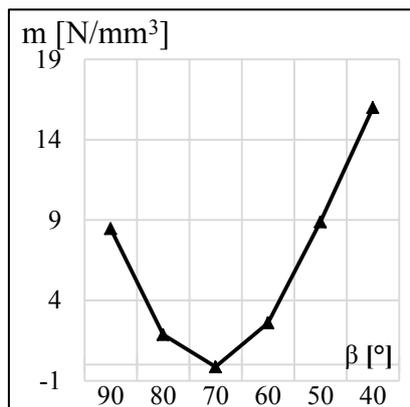


Abb. 8.38: Steigung m in Abhängigkeit des Winkels β nach (Willacker 2018) für den reibungsbehafteten Ansatz

Durch eine quadratische Regression werden die Koeffizienten a , b und c bestimmt (Tab. 8.11).

Tab. 8.11: Ergebnisse der Polynomregression zur Darstellung des Steigungsverhältnisses (Willacker 2017)

Ergebnisse der quadratischen Regression			
Koeffizient	a	b	c
Flanke	0,0160	-2,2393	79,3839

Die Belastungsverteilung an der Stelle $x_w = 0,42$ der linken Zahnflanke zeigt bei einer Steigerung m der Kraft F_{res} einen linearen Verlauf (Abb. 8.39).

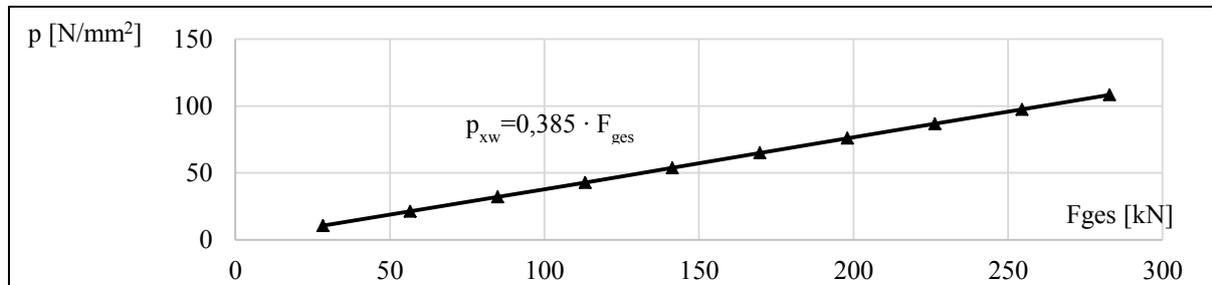


Abb. 8.39 Studie zur Belastungsentwicklung an der Stelle $x_w = 0,42$ mm in Abhängigkeit der Kraft F_{ges} (Willacker2017)

Die Vorgehensweise zur Berechnung der Pressungen beim reibungsbehafteten Kontakt gleicht jener des reibungsfreien Kontakts. Es sind die Parameter des reibungsbehafteten Kontakts zu verwenden.

8.5 Spannungen am Zahn

Neben den Pressungen am Zahnkontakt müssen auch die Spannungen am Zahngrund bzw. im maßgebenden Bemessungsschnitt S_i betrachtet werden. Dazu wird die Ausgangssituation der angreifenden Belastung (Abb. 8.2) aufgegriffen (Abb. 8.40). Der s-förmige Verlauf und das damit verbundene Versatzmoment (vgl. Abb. 8.41) wird durch die von der Kraftneigung θ abhängige Kraftangriffshöhe h_{ze} ersetzt (Abb. 8.40). An drei Schnitten (Bemessungsschnitte) werden die Spannungen berechnet.

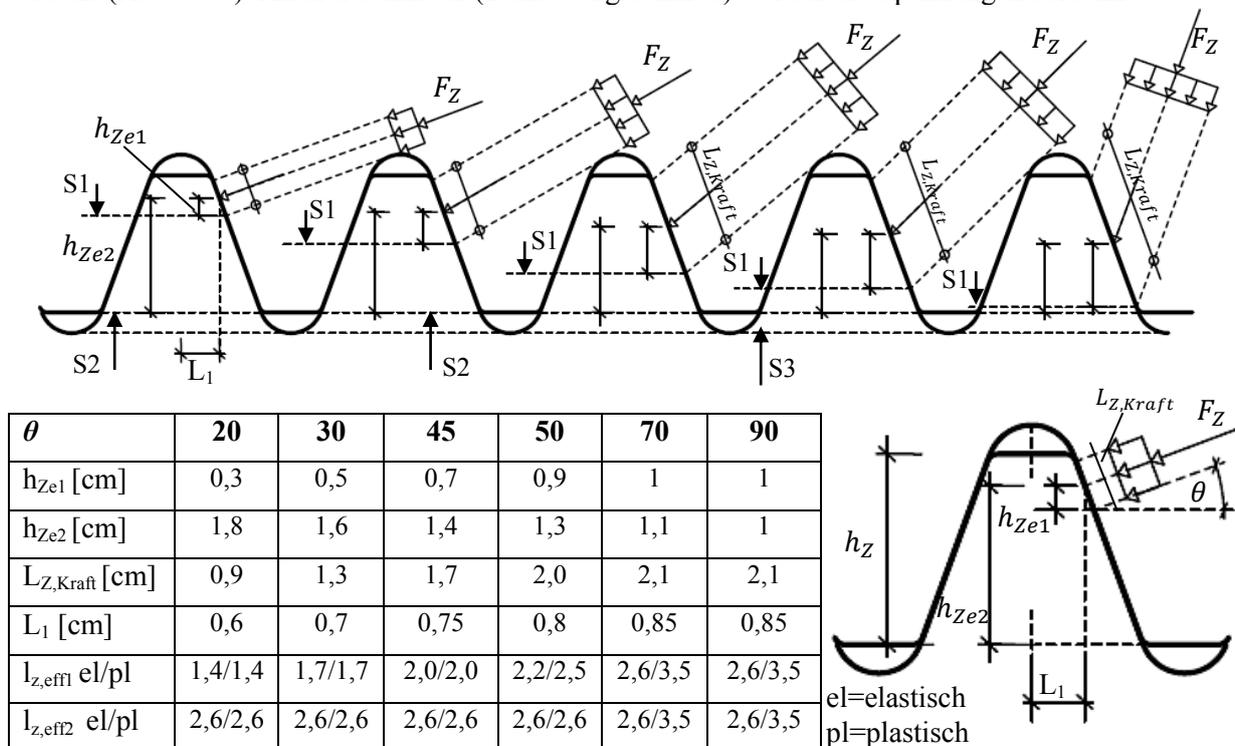


Abb. 8.40: Kraftangriffshöhe in Abhängigkeit der Kraftneigung θ

Der Schnitt 1 (S1) wird für Kraftneigungswinkel θ bis einschließlich 45° maßgebend. Für Winkel von $> 45^\circ$ wird der Schnitt 2 (S2) maßgebend. Bei Neigungswinkeln $\geq 70^\circ$ ist die Beanspruchung unterhalb der Zähne weitgehend konstant. Deshalb wird für plastische Berechnungen mit Neigungswinkel $\geq 70^\circ$ der Schnitt 3 (S3) verwendet. Aus der an der Zahnflanke angreifenden Kraft F_Z entstehen am Zahngrund bzw. im maßgebenden Bemessungsschnitt Druck-, Schub-, und Biegespannungen (Abb. 8.41). Die Biegespannungen $\sigma_{E,B}$ setzen sich aus dem Versatzmoment $F_Z \cdot e_1$ und dem Moment aus $F_Z \cdot e_2$ zusammen. Die Schnittgrößen im Schnitt 2 sind bei der Betrachtung des Kraftangriffs ohne Versatz e (Abb. 8.40 u. Abb. 8.41 rechts) gleich denen des Kraftangriffs mit Versatz (Abb. 8.41 links).

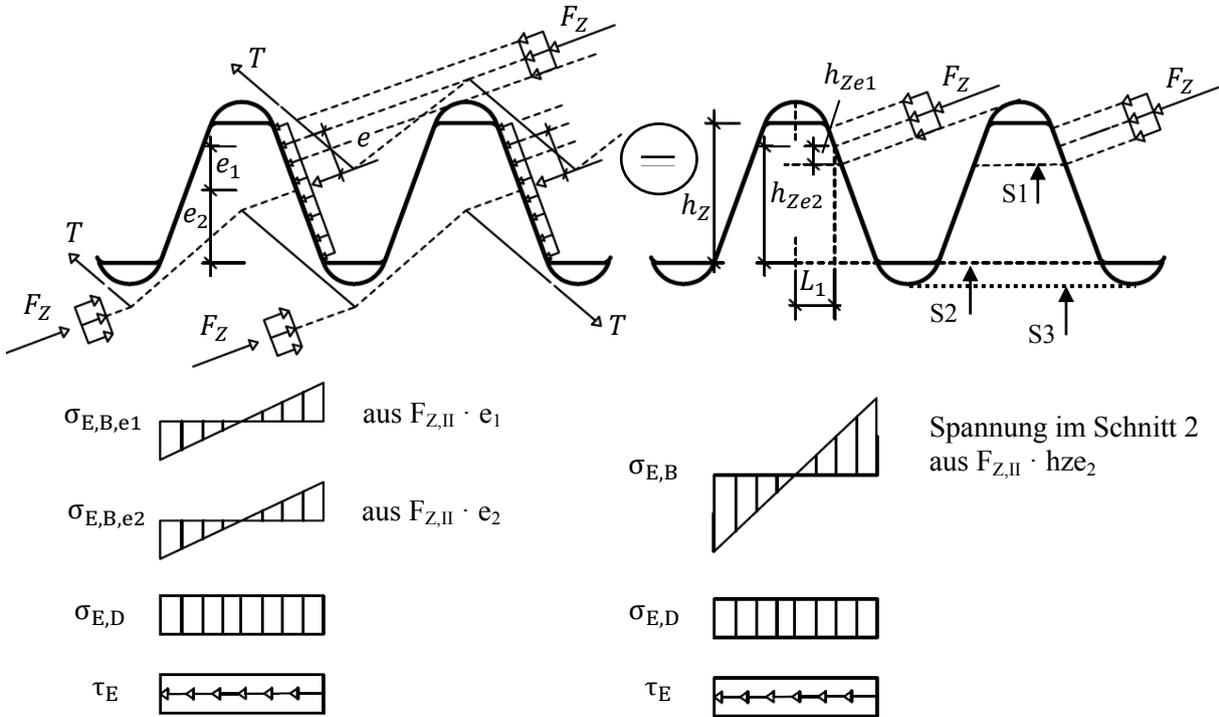


Abb. 8.41: Darstellung der Gleichwertigkeit durch den Kraftangriff mit und ohne Versatz e hinsichtlich der Schnittgrößen am Beispiel der Kraftneigung 20°

Die Horizontal- und Vertikalkomponente der Kraft F_Z erzeugen die Spannungen in den Bemessungsschnitten (Abb. 8.42).

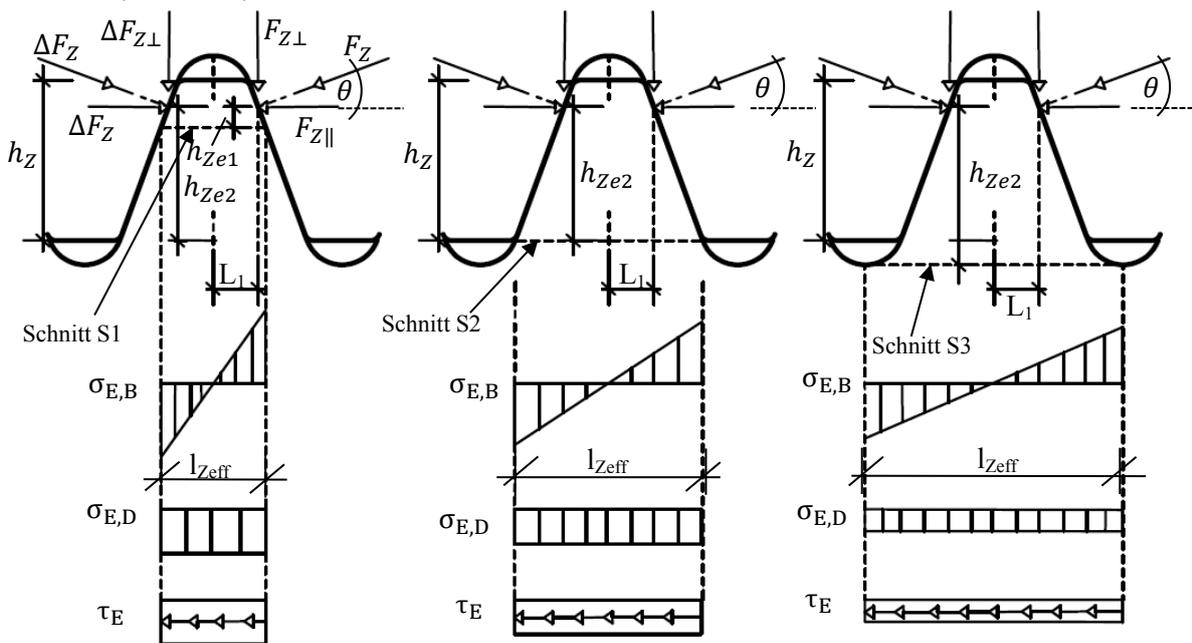


Abb. 8.42: Kräfte am Zahn und Spannungen im Schnitt 1, 2 und 3

Elastische Spannungsberechnungen:

Es müssen im Bemessungsschnitt die Vergleichsspannungen aus Biegung, Druck und Schub berücksichtigt werden. Die Biegespannungen berechnen sich elastisch zu:

$$\sigma_{E,B,el} = \frac{M}{W} = \frac{\left((F_{z\parallel} - \Delta F_{z\parallel}) \cdot h_{ze} - F_{z\perp} \cdot L_1 + \Delta F_{z\perp} \cdot L_1 \right) \cdot 6}{l_{z,eff}^2 \cdot b_z} \quad (Gl. 8.71)$$

Mit:

L_1 = Abstand zwischen Zahnachse und Kraftangriff der senkrechten Kraftkomponente

Die Druckspannungen resultieren aus den Kraftanteilen rechtwinklig zum Zahngrund:

$$\sigma_{E,D,el} = \frac{F_{z\perp} + \Delta F_{z\perp}}{b_z \cdot l_{z,eff}} \quad (Gl. 8.72)$$

Die Schubspannungen betragen:

$$\tau_{E,el} = \frac{F_{z\parallel} - \Delta F_{z\parallel}}{b_z \cdot l_{z,eff}} \quad (Gl. 8.73)$$

Die Vergleichsspannungen werden berechnet zu:

$$\sigma_{V,E,el} = \sqrt{\sigma_x^2 + \sigma_y^2 + \sigma_z^2 - \sigma_x \cdot \sigma_y - \sigma_x \cdot \sigma_z - \sigma_y \cdot \sigma_z + 3 \cdot (\tau_{xy}^2 + \tau_{xz}^2 + \tau_{yz}^2)} \quad (Gl. 8.74)$$

$$\sigma_{V,E,el} = \sqrt{(\sigma_{E,B,el} + \sigma_{E,D,el})^2 + 3 \cdot \tau_{E,el}^2} \quad (Gl. 8.75)$$

Plastische Spannungsberechnungen:

Die Nachweisführung elastisch – plastisch erfolgt über eine Interaktion nach Eurocode 3 (Gl. 8.76). Dabei werden die einwirkenden Schnittgrößen N , M und V mit den aufnehmbaren plastischen Schnittgrößen verglichen. Der Anteil der Querkraft wird dabei über den aus dem Fließkriterium abgeleiteten Faktor α_V berücksichtigt.

$$\left(\frac{N}{\alpha_V \cdot N_{pl}} \right)^2 + \frac{M}{\alpha_V \cdot M_{pl}} \leq 1 \quad (Gl. 8.76)$$

Mit:

$$V = F_{z\parallel,k} - \Delta F_{z\parallel,k} \quad (Gl. 8.77)$$

$$N = F_{z\perp,k} + \Delta F_{z\perp,k} \quad (Gl. 8.78)$$

$$M = (F_{z\parallel,k} - \Delta F_{z\parallel,k}) \cdot h_{ze} \quad (Gl. 8.79)$$

$$V_{pl} = \frac{f_{y,k}}{\sqrt{3}} \cdot h \cdot b_z \quad (Gl. 8.80)$$

$$N_{pl} = f_{y,k} \cdot h \cdot b_z \quad (Gl. 8.81)$$

$$M_{pl} = \frac{1}{4} \cdot f_{y,k} \cdot h^2 \cdot b_z \quad (Gl. 8.82)$$

$$\alpha_V = \sqrt{1 - \left(\frac{V}{V_{pl}} \right)^2} \quad (Gl. 8.83)$$

8.6 Fazit zu den Pressungen an der Zahnflanke und den Spannungen im Zahn

Die Pressungen an der Zahnflanke können für linear-elastische Berechnungen (el-el) an drei Teilbereichen (Kopf, Flanke, Fuß) berechnet werden. Dabei wird am Flankenkopf und am Flankenfuß das Phänomen ähnlich der Hertz'schen Pressungen berücksichtigt. Die vorhandenen Pressungen in diesen Bereichen werden mit den aufnehmbaren Pressungen nach Hertz (Tab. 3.7) verglichen. Am dazwischen liegende Bereich „Flanke“ erfolgt eine elastische Spannungsberechnung aus angreifenden Kraftanteil $F_{Z,Flanke}$ bezogen auf die Flankenfläche. Die Pressungen sind in allen Teilbereichen über die gesamte Zahnflanke linear von der angreifenden Kraft abhängig. Bei der Berücksichtigung von plastischem Materialverhalten beim Ansatz elastisch-plastisch (el-pl) kann auf Bemessungsniveau die Pressungsverteilung am Zahnkontakt konstant angesetzt werden.

Die Spannungen am Zahn resultieren aus den Kräften F_Z und ΔF_Z . Es wird die Biegespannung, die Druckspannung sowie die Schubspannung und daraus die Vergleichsspannung nach von Mises am Zahnfuß bzw. im maßgebenden Bemessungsschnitt (Schnitt 1, 2, 3) (vgl. Abb. 8.42) berechnet. Die Biegespannungen sowie die Schubspannungen im Zahn nehmen mit zunehmendem Kraftneigungswinkel θ ab, während die Druckspannungen zunehmen. Bei der Berechnung werden sowohl die Nachweise für die Zahnflanke als auch die des Zahn geführt.

Die auftretenden Pressungen an der Zahnflanke und die Spannungen im maßgebenden Bemessungsschnitt des Zahn in Abhängigkeit des Kraftneigungswinkels zeigen, dass die Vergleichsspannungen in den Bemessungsschnitten des Zahn maßgebend werden (Abb. 8.43). Dabei ist bei Kraftneigungswinkeln $\leq 45^\circ$ der Schnitt 1 und bei Winkeln $> 45^\circ$ der Schnitt 2 maßgebend. Bei der plastischen Berechnung kann für Kraftneigungswinkel $\theta \geq 70^\circ$ der Schnitt 3 angesetzt werden. Die Pressungen an der Zahnflanke werden bei den betrachteten Parametern nicht maßgebend.

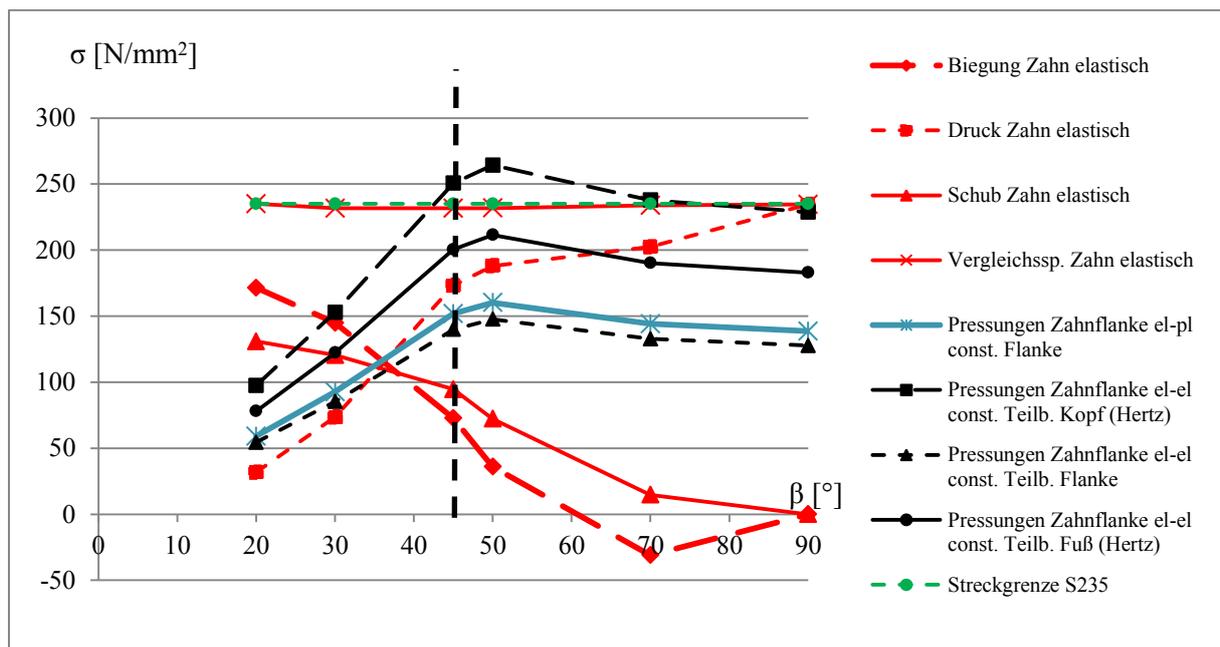


Abb. 8.43: Elastische Spannungsberechnungen am Stahlzahn

Anhand der Spannungsberechnungen werden für die elastische Berechnung (el-el) und für die plastische Berechnung (el-pl) Maximalwerte für die Kraft je Zentimeter Zahnlänge q_{sz} angegeben. Dabei wird die Reibung auf der sicheren Seite liegend vernachlässigt. Bei zunehmenden Kraftneigungswinkel steigt die aufnehmbare Kraft an. Ab einem Kraftneigungswinkel ab 50° verläuft die Kurve der aufnehmbaren Kraft degressiv. In der Berechnung liegt das an der Druckkraft, welche bei einer Neigung von 90° nicht durch eine parallel zur verzahnten Fuge verlaufenden Kraft reduziert wird. Die Versuche haben jedoch gezeigt, dass die aufnehmbare Kraft weiter erhöht werden kann. Damit liegt die Berechnung auf der sicheren Seite. Die berechneten Tragfähigkeiten werden mit den Versuchsergebnissen verglichen. Die Werte aus den Versuchen zeigen den noch vorhandenen Sicherheitsabstand zur elastischen Berechnung ($f_{yk} = 235 \text{ N/mm}^2$) sowie der plastischen Berechnung ($f_{uk} = 235 \text{ N/mm}^2$).

(Abb. 8.44). Neben der für die Bemessung relevanten Streckgrenze f_y wurde auch die Zugfestigkeit 360 N/mm^2 nach Norm, 440 N/mm^2 nach dem Zugversuch des verwendeten Stahls sowie die der wahren Spannung 550 N/mm^2 als Grenze bei der Berechnung der aufnehmbaren Spannung eingesetzt. Mit diesen Berechnungen werden auch die Ergebnisse der durchgeführten Versuche verglichen. Der Vergleich zeigt eine gute Übereinstimmung der Versuchsergebnisse mit der Berechnung mit wahren Spannungen, welche sich aus den Zugversuchen berechnen lassen. Beim Kraftneigungswinkel 70° und 90° liegt die Berechnung oberhalb der Versuchsergebnisse (Abb. 8.44). Das wird mit dem aus Sicherheitsgründen bedingten Abbruch dieser Versuche vor Erreichen des Plateaus erklärt (vgl. Anhang S. 25).

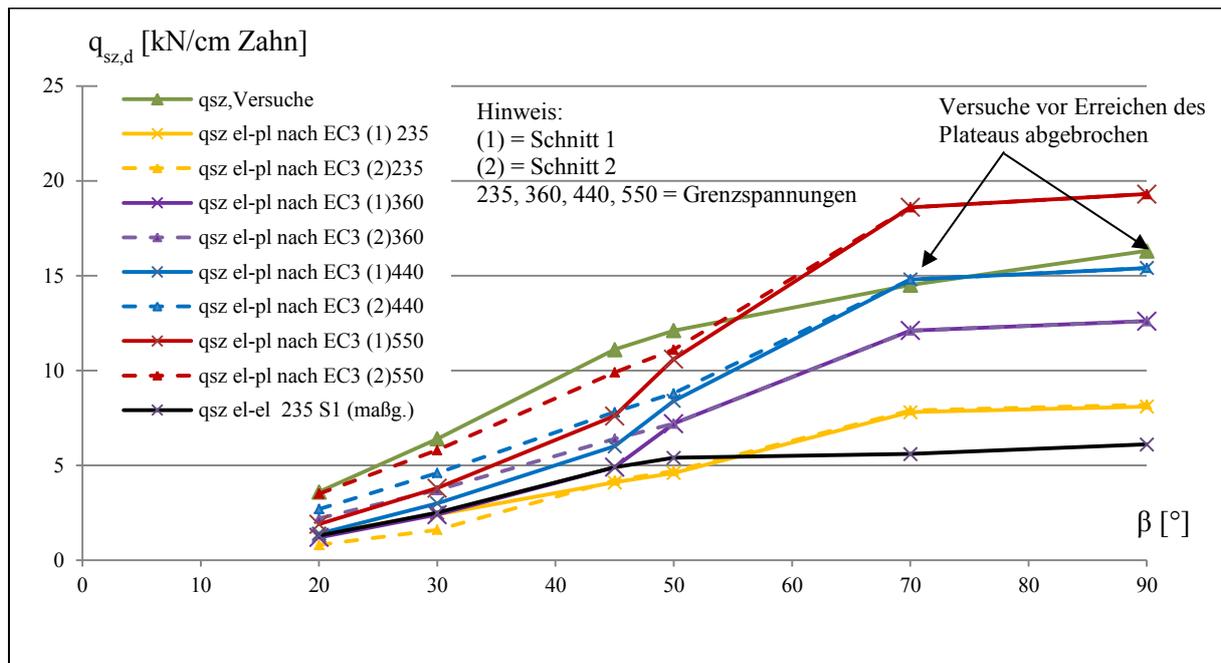


Abb. 8.44: Rechnerisch aufnehmbare Kraft pro cm Zahn $q_{sz,d}$ in Abhängigkeit des Kraftneigungswinkels θ und der Grenzspannung sowie Tragfähigkeit aus den Versuchen

8.7 Zusammenfassung

Das Ingenieurmodell zum Tragverhalten der Stahlverzahnung beschreibt den Kraftfluss und die damit einhergehenden Spannungen in der Stahlzahnleiste. Zunächst werden in einem FE-Modell zwei aufeinanderliegende Zahnleisten abgebildet. Die Kraftübertragung an den feinen Stahlzähnen erfolgt dabei über Kontakt. Der Kraftfluss im Modell wird anhand von Spannungsvektoren gezeigt. Auf Grundlage der Spannungsvektoren wird der Kraftverlauf mithilfe eines Stabwerkmodells interpretiert.

In einer Parameterstudie werden verschiedene Einflüsse untersucht und die Spannungen am FE-Modell berechnet. Die Spannungen werden an jedem Zahn im gleichen Bereich gemessen und bilden entlang der Verzahnung einen Belastungsverlauf. Am Anfang der Zahnleiste steigen die Belastungen entlang der ersten vier Zähne an. Danach bleiben die Belastungen konstant und am Ende der Zahnleiste nehmen diese entlang der letzten vier Zähne ab. Damit wird die gesamte Zahnleiste in einen „steigenden Bereich“, einen „konstanten Bereich“ und einen „fallenden Bereich“ eingeteilt. Dieses Verhalten zeigt sich bei allen untersuchten Einflüssen. Deshalb kann diesen Bereichen ein prozentualer Anteil des Lastabtrags zugewiesen werden. Dieser wird mit dem Faktor k_j ($j = \text{Steigend, Konstant, Fallend}$) berücksichtigt. Über die Anzahl der Zähne ist die angreifende Kraft an jedem Zahn bekannt.

In einem nächsten Schritt werden die Belastungen am Zahnkontakt näher untersucht. Auch hierzu werden die Parameterstudien verwendet. Für jeden der Bereiche „steigend“, „konstant“, und „fallend“ kann der Belastungsanteil berechnet werden. Im Ingenieurmodell wird der konstante Bereich genauer untersucht. Es werden eine Zahnflanke entgegen der Kraftrichtung und eine Zahnflanke in Kraftrichtung unterschieden (Abb. 8.25). Jede Zahnflanke lässt sich weiter in einen Flankenkopf, eine Flanke (mittlerer Bereich) und einen Zahnfuß unterteilen. Auch diesen Bereichen können wieder prozentuale

Anteile $k_{j(i = \text{Kopf, Flanke, Fuß})}$ am Lastabtrag zugewiesen werden. Der elastische Belastungsverlauf entlang der Zahnflanke zeigt an den Rändern Pressungserhöhungen. Diese können auf das Phänomen der Hertz'schen Pressungen zurückgeführt werden. Der Belastungsverlauf an der Zahnflanke kann mit drei linearen Teilbereichen (trapezförmig) beschrieben werden. Dabei stehen die beiden extremalen Pressungswerte eines jeden trapezförmigen Verlaufs über eine Geradengleichung in Beziehung. Das Integral unter dem gesamten Pressungsverlauf, bzw. die Trapezflächen, stellen die resultierende Kraft F_Z an der Zahnflanke dar. Dieser Ansatz kann weiter vereinfacht werden, indem die drei Teilbereiche mit jeweils konstanter Pressung betrachtet werden. Bei plastischer Betrachtung kann die Pressungsverteilung über die gesamte Zahnflanke als konstant angenommen werden.

Es wird eine analytische Lösung entwickelt, mit der Pressungen am Zahn an einer Stelle x sowie über einen beliebigen Bereich gemittelt berechnet werden können. Dieser Ansatz beruht auf einem linear-elastischen Werkstoffgesetz. Es besteht die Möglichkeit, bei den Eingabewerten zwischen einen reibungsfreien und einen reibungsbehafteten Kontakt mit einem Reibbeiwert $\mu = 0,15$ zu unterscheiden. Es wird darauf hingewiesen, dass die FE-Berechnungen mit reibungsbehafteten Kontakt etwa 15% geringere Pressungen zeigen. Dies liegt an der vergleichmäßigen Wirkung der Reibung.

Aufgrund des linear-elastischen Materialverhaltens hat dieser Ansatz Tragreserven durch die Verfestigung der Stahlzähne im plastischen Bereich.

Des Weiteren werden die Spannungsberechnungen im Zahn aufgezeigt. Diese sind bemessungsbestimmend. Zusammen mit den Pressungen am Zahnkontakt (Zahnflanke) bilden diese die Grundlage der Nachweisführung der Stahlverzahnung im Kapitel 9.

9. Bemessungsvorschlag für die neue Verbindung

9.1 Ziel und Vorgehensweise

Ziel ist es, einen Bemessungsvorschlag für die feine Stahlverzahnung sowie für die modulare Verbindung zu erarbeiten. Mit dem Ingenieurmodell werden der Kräfteverlauf innerhalb der Zahnleiste und die Belastungen an den Zähnen beschrieben. Weiterhin können die Spannungen am Zahngrund berechnet werden. Darauf aufbauend werden in einem ersten Schritt das Sicherheitskonzept und die Materialgesetze aufgeführt. Es folgt ein Bemessungsvorschlag für die feine Stahlverzahnung. Dieser ist wiederum ein Teil des allgemeinen Bemessungsvorschlags für modulare Verbindungen. Dabei werden alle Nachweise aufgeführt, um eine modulare Verbindung zu dimensionieren. Anhand der Anwendungen an einer Konsole und an einem Fachwerkknoten wird der allgemeine Bemessungsansatz konkret angewandt.

9.2 Sicherheitskonzept und Materialgesetze

9.2.1 Grenzzustand der Tragfähigkeit

Die Ermittlung der Einwirkungen für den Bemessungsansatz erfolgt nach der DIN EN 1990. Im Grenzzustand der Tragfähigkeit werden die Einwirkungen für die Grundkombination E_d und die außergewöhnliche Kombination E_{dA} ermittelt.

$$E_d = E \left[\sum_{j \geq 1} \gamma_{G,j} \cdot G_{k,j} \oplus \gamma_P \cdot P_k \oplus \gamma_{Q,1} \cdot Q_{k,1} \oplus \sum_{i > 1} \gamma_{Q,i} \cdot \psi_{0,i} \cdot Q_{k,i} \right] \quad (Gl. 9.1)$$

$$E_{dA} = E \left[\sum_{j \geq 1} \gamma_{GA,j} \cdot G_{k,j} \oplus \gamma_{PA} \cdot P_k \oplus A_d \oplus \psi_{1,1} \cdot Q_{k,1} \oplus \sum_{i > 1} \psi_{2,i} \cdot Q_{k,i} \right] \quad (Gl. 9.2)$$

Die Anwendung der Teilsicherheitsbeiwerte und der Kombinationsbeiwerte erfolgt sowohl für den Grenzzustand der Tragfähigkeit als auch für den Grenzzustand der Gebrauchstauglichkeit nach DIN EN 1990.

9.2.2 Grenzzustand der Gebrauchstauglichkeit

Im Grenzzustand der Gebrauchstauglichkeit werden die charakteristische (seltene) Kombination ($E_{d,rare}$), die häufige Kombination ($E_{d,frequ}$) und die quasi-ständige Kombination betrachtet.

$$E_{d,rare} = E \left[\sum_{j \geq 1} G_{k,j} \oplus P_k \oplus Q_{k,1} \oplus \sum_{i > 1} \psi_{0,i} \cdot Q_{k,i} \right] \quad (Gl. 9.3)$$

$$E_{d,frequ} = E \left[\sum_{j \geq 1} G_{k,j} \oplus P_k \oplus \psi_{1,1} \cdot Q_{k,1} \oplus \sum_{i > 1} \psi_{2,i} \cdot Q_{k,i} \right] \quad (Gl. 9.4)$$

$$E_{d,perm} = E \left[\sum_{j \geq 1} G_{k,j} \oplus P_k \oplus \sum_{i > 1} \psi_{2,i} \cdot Q_{k,i} \right] \quad (Gl. 9.5)$$

Nach DIN EN 1991-1 sind die Gebrauchskriterien als zulässige Spannungen, Rissbreiten und Verformungen definiert.

9.2.3 Materialgesetze

Die Ermittlung der Bemessungswerte für die Widerstände R_d erfolgen für linear-elastische Schnittgrößenberechnungen nach Gleichung (Gl. 9.6) (Nachweisverfahren Elastisch-Elastisch (EI-EI)). Dabei werden die Werkstoffe normalfester Beton (NFB), hochfester Beton (HFB) und ultrahochfester Beton (UHFB) sowie Betonstahl und Spannstahl verwendet.

$$R_d = R \left[\alpha_{cc} \cdot \frac{f_{ck}}{\gamma_c}; \alpha_{cc} \cdot \frac{f_{ck}}{\gamma_c \cdot \gamma'_c}; \frac{f_{yk}}{\gamma_s}; \frac{f_{tk,cal}}{\gamma_s}; \frac{f_{p0,1k}}{\gamma_s}; \frac{f_{pk}}{\gamma_s} \right] \quad (Gl. 9.6)$$

Nach DAfStb Sachstandsbericht UHFB (2008) wird empfohlen, einen zusätzlichen Sicherheitsbeiwert für ultrahochfesten Beton γ'_c anzusetzen.

$$\gamma'_c = \frac{1}{1,1 - \frac{f_{ck}}{500}} \quad (Gl. 9.7)$$

Die Langzeiteinwirkungen bei normalfesten Beton werden durch den Faktor $\alpha_{cc} = 0,85$ berücksichtigt. Die Teilsicherheitsbeiwerte werden nach DIN EN 1991-1 angewandt.

Für das Nachweisverfahren Elastisch-Plastisch (EI-PI) wird nach Eurocode 3 die Streckgrenze f_y des Stahls angesetzt. Beim Nachweisverfahren Elastisch-Elastisch werden in den Bereichen des Flankenkopfes und des Flankenfußes die aufnehmbaren Hertz'schen Pressungen in Ansatz gebracht. Für den dazwischen liegende Bereich, die Flanke, wird der Nachweis mit den Vergleichsspannungen geführt.

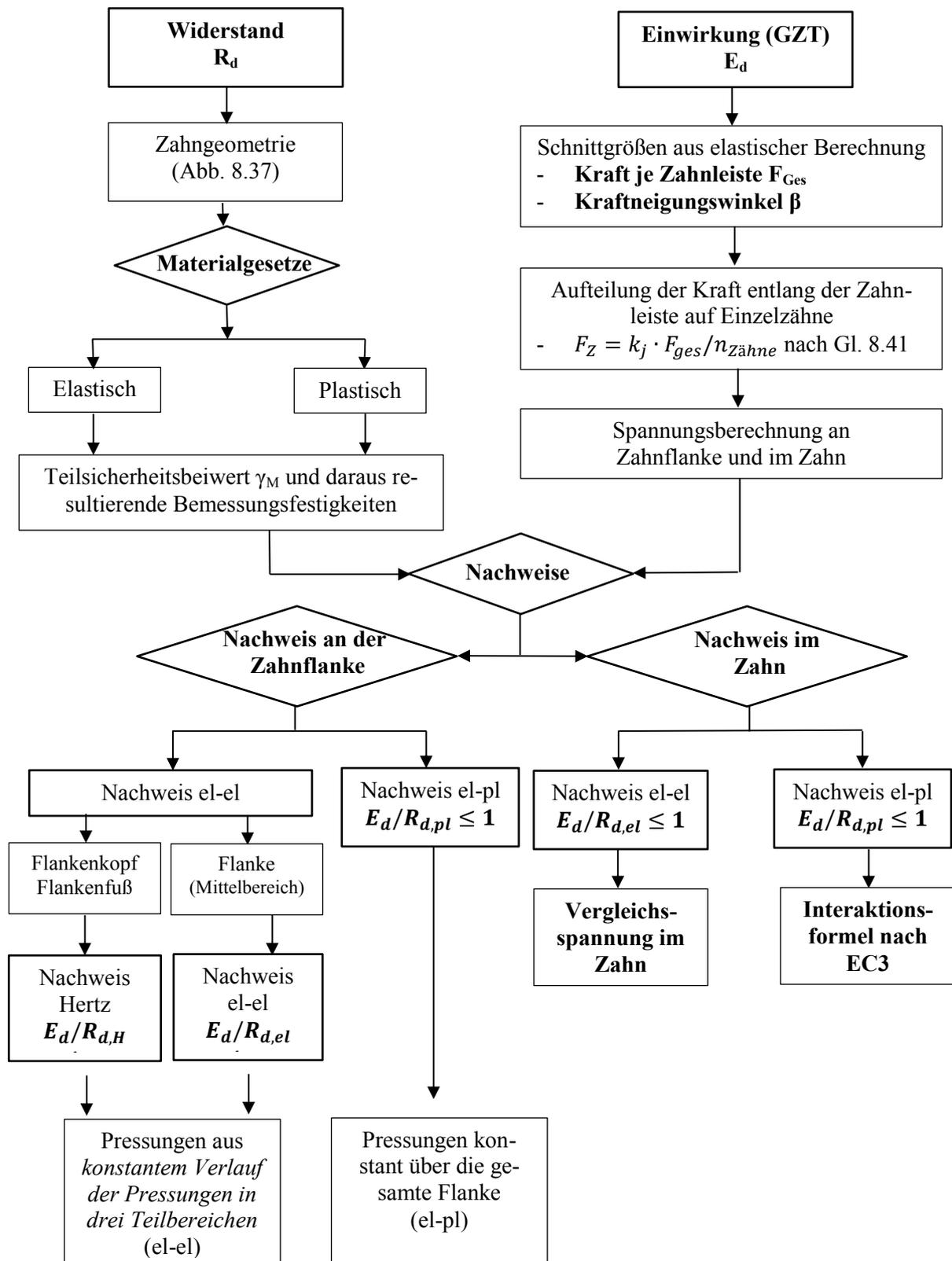


Abb. 9.1: Nachweisverfahren im Überblick

9.3 Bemessungsansatz für die feine Stahlverzahnung

9.3.1 Allgemeines

Zunächst wird der Bemessungsansatz für die feine Stahlverzahnung separat betrachtet, da diese den Kern der Arbeit darstellt. Dabei werden die Erkenntnisse aus den Kapitel 8 sowie die Bemessungsgrundlagen aus dem Kapitel 9.2 verwendet.

Die Schnittgrößenermittlung der Tragstruktur erfolgt anhand einer linear-elastischen Berechnung. Aus dieser erhält der planende Ingenieur die auf die Verbindung einwirkende Kraft sowie den Kraftneigungswinkel β . Diese wird auf die Anzahl der Zahnleisten aufgeteilt. Je Zahnleiste ist nun die Kraft F_{Ges} unter dem Winkel β bekannt.

Unter der Berücksichtigung, dass sich die Belastung entlang der Verzahnung in die Bereiche „Belastung steigend“, „Belastung konstant“ und „Belastung fallend“ aufteilt, wird die Belastung je Zahn F_Z berechnet (Gl. 8.41).

Für die Nachweise im Grenzzustand der Tragfähigkeit gilt:

$$E_d/R_d \leq 1 \quad (Gl. 9.8)$$

9.3.2 Nachweisführung Elastisch-Elastisch

Belastung am Zahn (el-el)

$$F_Z = k_j \cdot F_{ges}/n_{Zähne} \text{ nach Gl. 8.41}$$

Mit

$$k_j = \frac{\text{Mittelwert [\%]}}{100} \quad [-]$$

$n_{Zähne}$ = Anzahl der Zähne im betrachteten Bereich (steigend, konstant, fallend)

F_{ges} = Gesamtkraft auf die Zahnleiste

Material (el-el)

Die Bemessungsfestigkeiten der Stahlverzahnung werden für den Nachweis EI-EI angesetzt zu:

$$\tau_{Rd,el} = \sigma_{Rd,el} / \sqrt{3} \quad (Gl. 9.9)$$

$$\sigma_{Rd,el} = f_y / \gamma_{M1} \quad (Gl. 9.10)$$

Für die lineare bzw. konstante Belastungsverteilung bei der Betrachtung von drei Teilbereichen entlang der Zahnflanke, dürfen die einwirkenden Pressungen für den Flankenkopf und Flankenfuß aufgrund der begrenzten Kontaktfläche den ertragbaren Pressungen nach Hertz gegenübergestellt werden (vgl. Tab. 3.7).

$$\sigma_{Rd,Hertz} = f^{Hertz} / \gamma_{M1} \quad (Gl. 9.11)$$

Spannungsberechnung und Nachweis an der Zahnflanke (el-el)

Konstante Belastungsverteilung entlang von drei Teilbereichen der Zahnflanke

Weiterhin ist es möglich, die durchschnittlichen Pressungen in den einzelnen Bereichen - Flankenkopf, Flanke, Flankenfuß - zu berechnen (Gl. 9.12 bis 9.14).

$$p_{Ed,Kopf} = \frac{k_{Kopf} \cdot F_{zd}}{x_{Kopf} \cdot b_z} \quad (Gl. 9.12)$$

$$p_{Ed,Flanke} = \frac{k_{Flanke} \cdot F_{zd}}{x_{Flanke} \cdot b_z} \quad (Gl. 9.13)$$

$$p_{Ed,Fuß} = \frac{k_{Fuß} \cdot F_{zd}}{x_{Fuß} \cdot b_z} \quad (Gl. 9.14)$$

Mit

k_{Kopf} , k_{Flanke} , $k_{Fuß}$ nach Anhang E

$F_{zd} = \gamma \cdot F_z$ mit F_z nach Gl. 8.41

x_{Kopf} , x_{Flanke} , $x_{Fuß}$ = Abschnitte der Flankenlänge (kann angesetzt werden mit $x_{Kopf} = 0,20\text{mm}$; $x_{Flanke} = 1,60\text{mm}$; $x_{Fuß} = 0,34\text{mm}$)

b_z = Breite der Zahnleiste

Lineare Belastungsverteilung entlang von drei Teilbereichen der Zahnflanke

Es wird die lineare Belastungsverteilung am Zahnkontakt mit den Gleichungen (Gl.8.68), (Gl. 8.69) und (Gl.8.70) berechnet. Die auftretenden Spannungen werden mit der aufnehmbaren Spannung σ_{Rd} verglichen.

Es kann unter einen reibungsfreien Ansatz und einen reibungsbehafteten Ansatz unterschieden werden. Die Gleichungen zur Berechnung der Spannungen bleiben identisch, jedoch die Eingangswerte ändern sich.

Nachweis:

Unter Anwendung des Kapitels 9.2 werden die Designwerte der Pressungen ermittelt und der Nachweis nach den Gleichungen (Gl. 9.15) und (Gl. 9.16) geführt.

$$\frac{p_{Ed,D,Flanke}}{\sigma_{Rd,el}} \leq 1 \quad (Gl. 9.15)$$

$$\frac{p_{Ed,D,Kopf/Fuß}}{\sigma_{Rd,Hertz}} \leq 1 \quad (Gl. 9.16)$$

Spannungsberechnung und Nachweise im Zahn (el-el)

Die Spannungen im Zahn werden analog der Gleichungen (Gl.8.68) bis (Gl.8.72), jedoch mit Designwerten berechnet.

Biegespannungen im Zahn:

$$\sigma_{Ed,B,el} = \frac{M}{W} = \frac{((F_{z\parallel,d} - \Delta F_{z\parallel,d}) \cdot h_{ze} - F_{z\perp,d} \cdot l_1 + \Delta F_{z\perp,d} \cdot l_1) \cdot 6}{l_{z,eff}^2 \cdot b_z} \quad (Gl. 9.17)$$

Druckspannungen im Zahn:

$$\sigma_{Ed,D} = \frac{F_{z\perp,d} + \Delta F_{z\perp,d}}{b_z \cdot l_{z,eff}} \quad (Gl. 9.18)$$

Schubspannungen im Zahn:

$$\tau_{Ed} = \frac{F_{z\parallel,d} - \Delta F_{z\parallel,d}}{b_z \cdot l_{z,eff}} \quad (Gl. 9.19)$$

Vergleichsspannung im Zahn :

$$\sigma_{V,Ed} = \sqrt{(\sigma_{Ed,B,el} + \sigma_{Ed,D})^2 + 3 \cdot (\tau_{Ed}^2)} \quad (Gl. 9.20)$$

$$\frac{\sigma_{Ed,V}}{\sigma_{Rd,el}} \leq 1 \quad (Gl. 9.21)$$

9.3.2 Nachweisführung Elastisch-Plastisch

Belastung am Zahn (el-pl)

$$F_Z = \frac{F_{ges}}{n_{Zähne}} \quad (Gl. 9.22)$$

$n_{Zähne}$ = Anzahl der Zähne im betrachteten Bereich (steigend, konstant, fallend)

F_{ges} = Gesamtkraft auf die Zahnleiste

Material (el-pl)

Für den Nachweis El-Pl gilt:

$$\tau_{Rd,el} = \sigma_{Rd,el} / \sqrt{3} \quad (Gl. 9.23)$$

$$\sigma_{Rd,el} = f_y / \gamma_{M1} \quad (Gl. 9.24)$$

Die Nachweise werden am Zahnkontakt und im Zahn geführt (vgl. Abb. 8.36).

Spannungsberechnung und Nachweis an der Zahnflanke (el-pl)

Konstante Belastungsverteilung entlang der gesamten Zahnflanke

Für den Nachweis Elastisch-Plastisch werden die Pressungen über die gesamte Flankenlänge gemittelt (Gl. 9.25).

$$p_{Ed,Zahnflanke} = \frac{F_{zd}}{x_{Zahnflanke} \cdot b_z} \quad (Gl. 9.25)$$

Mit

$F_{zd} = \gamma \cdot F_z$ mit F_z nach Gl. 8.41

$x_{Zahnflanke}$, = gesamte Zahnflankenlänge 2,14mm

b_z = Breite der Zahnleiste

γ = Teilsicherheitsbeiwert auf der Einwirkungsseite

Nachweis:

$$\frac{p_{Ed,D}}{\sigma_{Rd,pl}} \leq 1 \quad (Gl. 9.26)$$

Spannungsberechnung und Nachweise im Zahn (el-pl)

Die Spannungen im Zahn werden analog der Gleichungen (Gl.8.76) bis (Gl.8.83) nach Eurocode 3, jedoch mit Designwerten berechnet.

$$\left(\frac{N_{Ed}}{\alpha_V \cdot N_{pl}} \right)^2 + \frac{M_{Ed}}{\alpha_V \cdot M_{pl}} \leq 1 \quad (Gl. 9.27)$$

Mit:

$$V_{Ed} = F_{z||,d} - \Delta F_{z||,d} \quad (Gl. 9.28)$$

$$N_{Ed} = F_{z\perp,d} + \Delta F_{z\perp,d} \quad (Gl. 9.29)$$

$$M_{Ed} = (F_{z||,d} - \Delta F_{z||,d}) \cdot h_{ze} \quad (Gl. 9.30)$$

$$V_{pl} = \frac{f_{y,Rd}}{\sqrt{3}} \cdot h \cdot b_z \quad (Gl. 9.31)$$

$$N_{pl} = f_{y,Rd} \cdot h \cdot b_z \quad (Gl. 9.32)$$

$$M_{pl} = \frac{1}{4} \cdot f_{y,Rd} \cdot h^2 \cdot b_z \quad (Gl. 9.33)$$

$$\alpha_V = \sqrt{1 - \left(\frac{V_{Ed}}{V_{pl}} \right)^2} \quad (Gl. 9.34)$$

9.4 Bemessungsansatz für die Konsole

9.4.1 System und Konstruktion

Die Aufteilung der Kräfte und das damit verbundene Kräftegleichgewicht der Konsole erfolgt über einen Zugstab und eine Druckdiagonale nach der Stabwerksanalogie (Abb. 9.2). Die Konsole wird mithilfe der Gewindestangen an die Stütze vorgespannt. Daher bildet sich sowohl ein Druckpunkt oberhalb der Gewindestange als auch am Stahleinbauteil aus, solange am Druckpunkt (F_{D1}) oberhalb der Gewindestange Druck herrscht. Oberhalb der Gewindestange ist ein Flachstahl einzulegen, damit die Lage des Punktes definiert ist. Damit können über die Gleichgewichtsbedingungen die Kräfte F_{D1} und F_{D2} berechnet werden (Tab. 6.4). In Abhängigkeit der Kraft F_{D1} sowie des Reibbeiwertes μ zwischen Flachstahl und Betonkonsole wird zunächst in vertikaler Richtung eine Reibkraft A_{V1} oberhalb der Gewindestange übertragen. Die weitere Vertikalkraft A_{V2} wird vom Stahleinbauteil aufgenommen und in die Stütze weitergeleitet. Auf Bemessungsniveau wird die gesamte Vertikallast über die Zahnleiste übertragen.

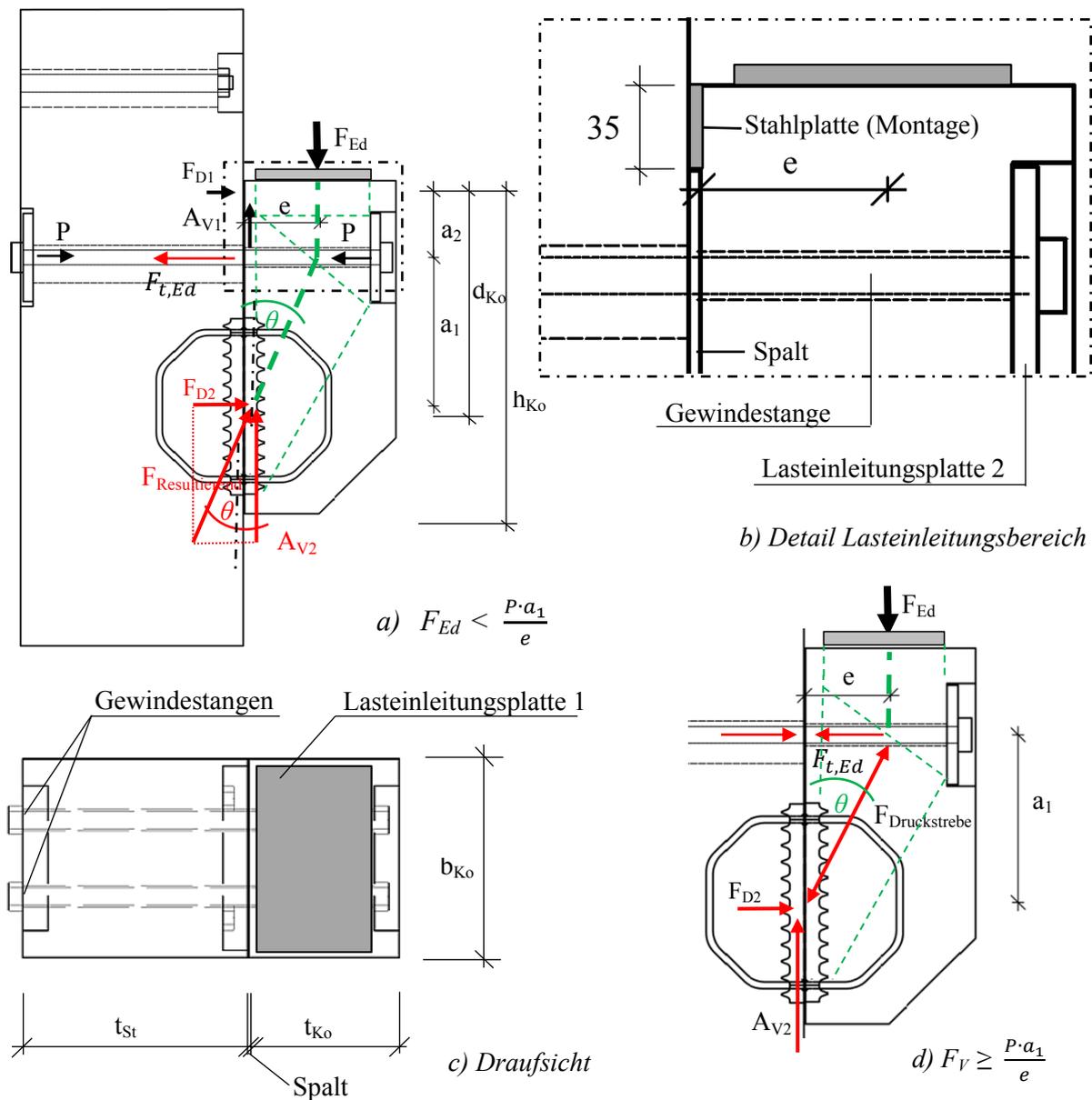


Abb. 9.2: System und Konstruktion der Konsole

9.4.2 Nachweisführung

Nachweis der Lasteinleitung:

Die Betonpressungen werden unterhalb der Vertikallasteinleitung und unterhalb der Ankerplatte der Vorspannung nachgewiesen. Dabei ist zu berücksichtigen, dass sich durch die Vertikallast eine Pressungserhöhung unterhalb der Ankerplatte der Vorspannung ergibt.

Spannungen für Lasteinleitung unter der Lagerplatte (Konsollast)

$$\sigma_{Ed,1} = \frac{F_{Ed}}{A_{Lasteinleitung\ 1}} \quad (Gl. 9.32)$$

Spannungen für Lasteinleitung unter der Stahlplatte der Gewindestangen (Lasteinleitung Zugstab)

$$\sigma_{Ed,2} = \frac{F_{t,Ed}}{A_{Lasteinleitung\ 2}} \quad (Gl. 9.33)$$

$$\sigma_{Rd} = 0,75 \cdot f_{cd} \quad (Gl. 9.34)$$

Mit dem Faktor 0,75 ist auch gleichzeitig der Nachweis der Druckstrebe (s. nachfolgend) geführt.

$$\sigma_{Ed}/\sigma_{Rd} \leq 1 \quad (Gl. 9.35)$$

Nachweis der Zugstrebe:

Die Zugstrebe wird mithilfe zweier Gewindestangen ausgeführt. Die Gewindestangen werden in der Regel vorgespannt. Demnach wirkt in den Gewindestangen die Zugkraft P aus der Vorspannung, der Beton erfährt in diesem Bereich eine Stauchung. Wird die Konsole belastet, hebt sich die Stauchung im Beton mit zunehmender Konsollast auf. Die aus der Konsollast resultierenden Zugkräfte in den Gewindestangen müssen von Spannungsquerschnitt aufgenommen werden. Da es sich um eine Zugkraft handelt, wird der Teilsicherheitsbeiwert $\gamma_m = 1,0$ verwendet.

$$F_{tEd} = \frac{F_{Ed} \cdot e}{a_1} \geq P \quad (Gl. 9.36)$$

$$\sigma_{Ed} = \frac{F_{t,Ed}}{A_{Gewindestab}} \quad (Gl. 9.37)$$

$$\sigma_{Rd} = \frac{f_{yd}}{\gamma_{M0}} \quad (Gl. 9.38)$$

$$\gamma_{M0} = 1,0$$

Bei bekannter Einwirkung kann die erforderliche Spannungsquerschnittsfläche bestimmt werden zu:

$$A_s = \frac{F_{t,Ed}}{\sigma_{Rd}} \quad (Gl. 9.39)$$

$$\frac{\sigma_{Ed}}{\sigma_{Rd}} \leq 1 \quad (Gl. 9.40)$$

Nachweis der Betondruckstrebe:

Vom Lasteinleitungspunkt der Vertikallast sowie der Vorspannungen verlaufen zwei dreidimensionale prismenförmige Druckstreben zu den Zahnleisten des Stahleinbauteils. Aufgrund der im Vergleich zu den Zahnleistenabmessungen größeren Querschnittsfläche ist die Druckstrebe nicht maßgebend und gilt als nachgewiesen, wenn der Druckpunkt und der Lasteinleitungsbereich nachgewiesen sind.

Dimensionierung der Bügel:

Allgemein müssen im Bereich der Druckstrebe Querzugspannungen durch Bewehrung aufgenommen werden. Dazu werden geschlossene Bügel verwendet. Mithilfe der Stabwerksanalogie werden die aufzunehmenden Zugkräfte berechnet und danach die Bewehrung dimensioniert.

In Anlehnung an Schwitzke (2011) wird für modulare Konsolen mit einem Verhältnis $e/a_1 < 0,90$ eine horizontale Bügelbewehrung für eine Kraft $F_{Bü,hor.} = 0,6 \cdot F_{Ed}$ vorgeschlagen, wobei e der Ab-

stand zwischen Stützenaußenkante und Lasteinleitung und a_1 der Abstand zwischen Zug- und Druckkomponente ist. Für ein Verhältnis $e/a_1 \geq 0,90$ ist eine vertikale Bügelbewehrung für eine Kraft $F_{Bü,vert.} = 0,8 \cdot F_{Ed}$ vorzusehen. Zusätzlich ist in den Randbereichen der Konsole konstruktive Bewehrung anzuordnen.

Nachweis des Druckpunktes (Bereich der Stahlzahnleiste):

Der Bereich, an dem die Druckkomponente der aufzunehmenden Belastung von einem Bauteil zum anderen übertragen wird, wird als Druckpunkt bezeichnet. An diesem befindet sich das Einbauteil. Es werden zwei Nachweisschnitte (Nachweisschnitt 1 und 2) untersucht (Abb. 9.3).

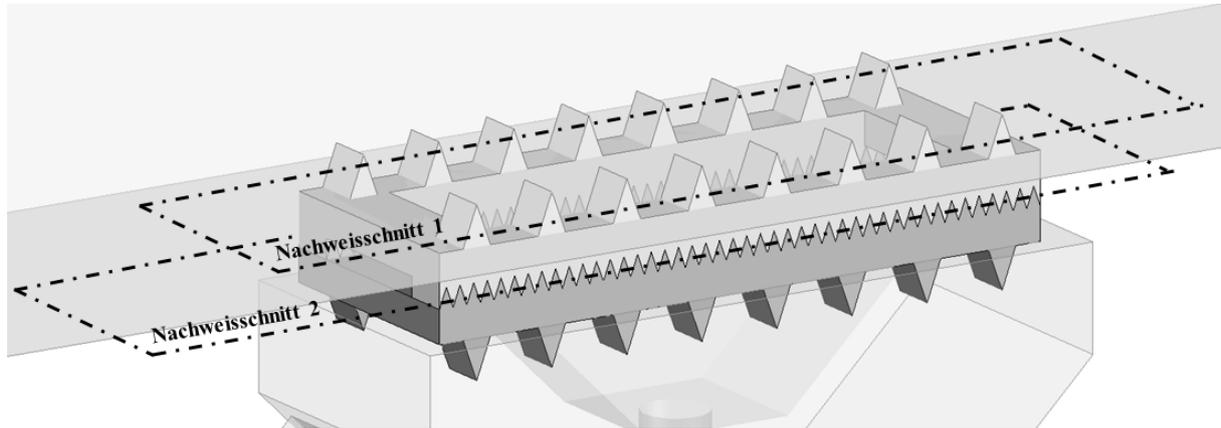


Abb. 9.3: Darstellung der Nachweisschnitte 1 und 2

Nachweisschnitt 1

Beim Nachweisschnitt 1 wird nachgewiesen, dass die Druckspannungen des Betons im Bereich der sich an den betonseitigen großen Stahlzähnen abstützenden Druckstreben, eingehalten sind. An diesen betonseitigen Stahlzähnen kann je nach aktivierter Angriffsfläche auf dem Stahlzahn die übertragbare Kraft berechnet werden zu:

$$F_{SB} = h_{z,a} \cdot b_z \cdot f_c \cdot n \tag{Gl. 9.41}$$

Dabei ist b_z die Breite der Zahnleiste, n die Anzahl der aktivierten betonseitigen großen Stahlzähne, $h_{z,a}$ die aktivierte Zahnhöhe, an der sich die Druckstrebe abstützt (Abb. 9.4). Diese ist abhängig von der Druckstrebenneigung θ und kann zeichnerisch ermittelt werden. Für ausgewählte Druckstrebenneigungen und eine Zahnhöhe von 15 mm sind die aktiven Zahnhöhen h_{za} tabellarisch aufgeführt (Tab. 9.2). Die Festigkeit f_c im Betondruckfeld vor dem Zahn wird bestimmt zu:

$$f_c = v \cdot f_{cd} \tag{Gl. 9.42}$$

Mit

$$v = 0,8, \text{ nach Schmid (2000)}$$

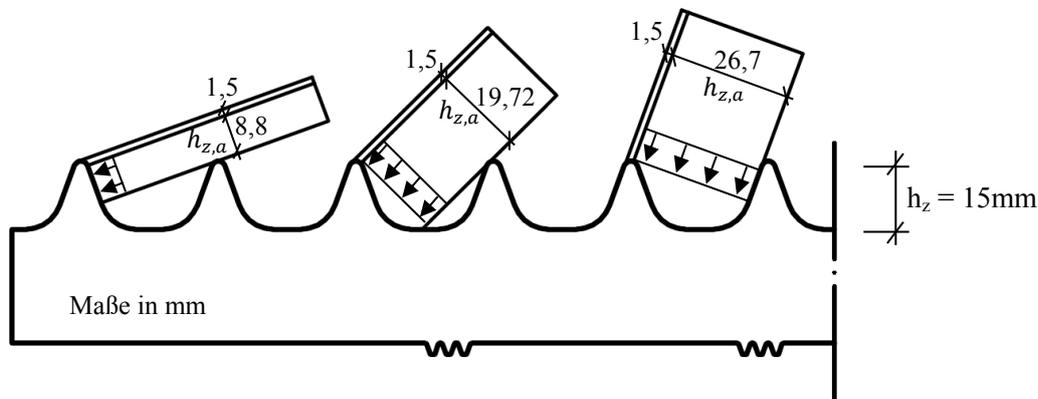


Abb. 9.4: Abstützung der Druckstreben an der betonseitigen Stahlverzahnung

Tab. 9.1: Aktivierte Zahnhöhe $h_{z,a}$ in Abhängigkeit der Druckstrebenneigung θ für $h_z = 15\text{mm}$

θ [°]	20	30	40	45	50	60	70
$h_{z,a}$ [mm]	8,8	13,5	17,8	19,7	21,5	24,5	26,7

Die Tragfähigkeit der betonseitigen großen Stahlzähne wird nicht maßgebend, da der Beton die schwächere Komponente ist.

Nachweisschnitt 2

Die Tragfähigkeit der feinen Stahlverzahnung im Nachweisschnitt 2 wird nach Kapitel 9.3 bestimmt.

9.5 Bemessungsansatz für den Fachwerkknoten

9.5.1 System und Konstruktion

Analog zur Konsole wird nachfolgend der Bemessungsansatz für den Fachwerkknoten beschrieben. Der Knotenpunkt besteht anders als die Konsole aus vier Elementen anstatt aus zwei Elementen. Dennoch ist die Konstruktion auf die Komponenten „Lasteinleitungsbereich“, „Druckstrebe bzw. Druckknoten“ und „Zugelement“ zurückzuführen. Das Zugelement führt hier mittig durch das Stahleinbauteil und hält dieses in der Lage gesichert. Da die Kraftresultierende oberhalb des Zugstabes auf das Stahleinbauteil trifft, kommt es zu keiner nennenswerten Verdrehung des Knotenelements (Abb. 9.5).

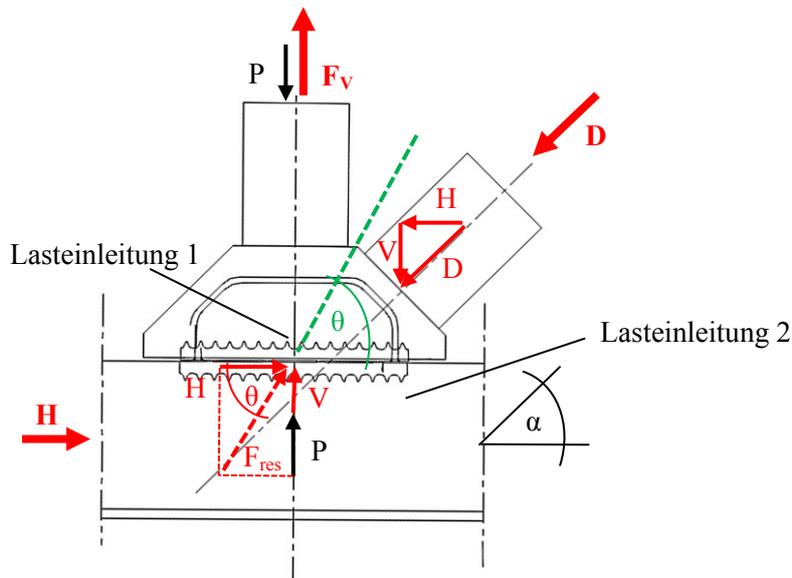


Abb. 9.5: System und Konstruktion des Fachwerkknoten

9.5.2 Nachweisführung

Nachweis der Lasteinleitung in das Knotenelement:

Die Druckspannungen werden zwischen Diagonale und Knotenelement sowie zwischen Pfosten und Knotenelement nachgewiesen.

$$\sigma_{Ed1} = \frac{D_{Ed}}{A_{Diagonale}} \quad (Gl. 9.43)$$

$$\sigma_{Ed2} = \frac{P - F_V}{A_{Pfosten}} \quad (Gl. 9.44)$$

Dabei sind folgende Zeitpunkte zu berücksichtigen:

- Zeitpunkt Vorspannung aufgebracht: P ist maximal und $F_V = 0$
- Zeitpunkt Fachwerkträger unter Volllast: Zugkraft F_V im Zugpfosten ist maximal

$$\frac{\sigma_{Ed2}}{\sigma_{Rd}} \leq 1 \quad (Gl. 9.45)$$

Mit:

$$\sigma_{Rd} = f_{cd}$$

Nachweis der Gewindestange:

Die Zugstrebe wird mithilfe einer Gewindestangen vorgespannt. Die Vorspannung P muss immer größer als F_V sein, damit sich die Fugen nicht öffnen.

$$F_{tEd} \approx P \quad (Gl. 9.46)$$

$$\sigma_{Ed} = \frac{F_{tEd}}{A_{\text{Gewindestab}}} \quad (Gl. 9.47)$$

$$\frac{\sigma_{Ed2}}{\sigma_{Rd}} \leq 1 \quad (Gl. 9.48)$$

Mit:

$$\sigma_{Rd} = f_{yd}$$

$$\gamma_{M0} = 1,0$$

Nachweis der Betondruckstrebe:

Auch beim Knotenelement verlaufen zwei dreidimensionale prismenförmige Druckstreben zu den Zahnleisten des Stahleinbauteils. Die Besonderheit beim Knotenelement ist der Hohlraum, welcher sich im Zentrum des Knotenelements befindet. Aufgrund der im Vergleich zu den Zahnleistenabmessungen größeren Querschnittsfläche ist die Druckstrebe nicht maßgebend. Der Nachweis ist erfüllt, wenn der Druckpunkt und der Lasteinleitungsbereich nachgewiesen sind.

Anordnung der Bewehrung:

Das Knotenelement ist mit geschlossenen Bügeln, welche vertikal und horizontal angeordnet werden zu bewehren. Die Dimensionierung der Bewehrung erfolgt nach der Stabwerksanalogie.

Nachweis des Druckpunktes (Bereich der Stahlzahnleiste):

Die Nachweisführung der betonseitigen großen Stahlverzahnung erfolgt nach Kapitel 9.4, die für die feine Stahlverzahnung nach Kapitel 9.3.

9.6 Zusammenfassung

Kapitel 9 stellt das Sicherheitskonzept und das Materialgesetz vor. Diese entsprechen der DIN EN 1990. Es wird ein Bemessungsansatz für die feine Stahlverzahnung formuliert. Dieser Bemessungsansatz beruht auf dem Ingenieurmodell aus Kapitel 8. Weiter wird ein allgemeiner Bemessungsansatz für die modulare Verbindung beschrieben. Darauf aufbauend wird dieser Bemessungsansatz für die beiden Anwendungsfälle einer Konsole sowie eines Fachwerkknotens konkretisiert.

10. Zusammenfassung und Ausblick

Im Rahmen der hier vorliegenden Dissertation wird eine modulare Verbindung für den Stahlbetonfertigteiltbau entwickelt. Diese Form der Verbindung ermöglicht die separate Fertigung zweier Stahlbetonfertigteile und deren Fügung auf der Baustelle. Die modulare Verbindung besteht aus zwei gezahnten Stahleinbauteilen, an denen die Bauteile miteinander verbunden werden. Dazu hat jedes Stahleinbauteil eine betonseitige große Stahlverzahnung, die auf der Betonseite die Kräfte aus dem Beton in die Stahlzahnleiste leitet. Auf der gegenüberliegenden Seite ist eine feine Stahlverzahnung angebracht, welche die Kräfte von einem Stahleinbauteil zum anderen überträgt. Die Kraftübertragung erfolgt über das formschlüssige Ineinandergreifen der feinen Stahlzähne. Um den Formschluss der Verbindung zu sichern, wird diese mit einer verbundlosen Vorspannung versehen. Dazu werden Gewindestangen verwendet. Diese Stahleinbauteile werden in der Schalung platziert.

Die Verbindung ist robust, duktil und kann große Kräfte übertragen. Die Herstellung ist einfach und lässt einen hohen Vorfertigungsgrad der Elemente zu. Auf diese Weise werden ein platzsparender

Transport der Fertigteilelemente sowie eine effiziente Montage und Demontage möglich. Auf einen Vergussmörtel auf der Baustelle kann verzichtet werden. Durch die feine Stahlverzahnung können Toleranzen gut ausgeglichen werden. Die Lage der Einbauteile zueinander kann auf der Baustelle bis auf eine halbe Zahnbreite (entspricht 1,8mm) genau platziert werden. Der Toleranzausgleich funktioniert durch ein Versetzen der Stahlzähne um einen oder mehrere Zähne. Es können viele Anschlusssituationen mit dieser Verbindung konstruiert werden.

Es werden die genannten Anforderungen an die Verbindung gestellt. Auf Grundlage dieser Anforderungen, und bereits bekannter modularer Verbindungen wird ein Verbindungskonzept erstellt. Ausgehend von Stahlzahnleisten, wie sie von Schlaich (1992), Schmid (2000) und Tandler (2011) entwickelt und eingesetzt werden, wird die modulare Verbindung entworfen. Diese beinhaltet nicht eine, sondern zwei sich gegenüberliegende Stahlzahnleisten zur Kraftübertragung. Beide Stahlzahnleisten nutzen zusätzlich die feine Stahlverzahnung zur Kraftübertragung zwischen den Stahlzahnleisten. Damit wird die Modularität der Verbindung hergestellt.

Um eine ideale Geometrie für die feine Stahlverzahnung zu entwerfen, werden Maschinenelemente analysiert. Auf Grundlage dieser Erkenntnisse werden erste Entwürfe angefertigt und die Vor- und Nachteile herausgestellt. Darauf aufbauend folgen weitere Entwürfe, welche in FE-Rechnungen mit dem Computerprogramm Ansys numerisch hinsichtlich der Vergleichsspannungen untersucht werden. Anhand dieser Studien wird eine Zahngeometrie gewählt, an der weitere Parameterstudien durchgeführt werden. Nach der analytischen und numerischen Untersuchung wird die Zahngeometrie in vier experimentellen Versuchsphasen untersucht. In den Versuchen zur Zahngeometrie (Phase I) werden kleinformartige Stahlprismen mit schräger gezahnter Kontaktfläche mit einer Druckkraft belastet und damit der Druckstrebenneigungswinkel θ auf die Stahlzähne untersucht. Es werden Druckstrebenneigungswinkel $\theta = 20^\circ, 25^\circ, 30^\circ, 45^\circ, 50^\circ, 70^\circ$ und 90° geprüft. Dabei wird die Stahlverzahnung lokal ohne weitere Einflüsse betrachtet. In den Kleinversuchen (Phase II) werden Zahnleistenpaare in Betonprismen platziert und getestet. Dabei wird der Einfluss des umliegenden Betons berücksichtigt. Hier werden die Winkel $\theta = 30^\circ$ und $\theta = 70^\circ$ getestet. In Versuchen zur Konsole (Phase III) werden modulare Konsolen und in den Versuchen zum Fachwerkknoten (Phase IV) modulare Fachwerkknoten im Maßstab 1 zu 1 untersucht.

Die Prüfkörper werden aus S235 gefertigt. Dabei orientieren sich die Geometrie der Prüfkörper und insbesondere die Anzahl der feinen Stahlzähne an der maximalen Prüfkraft der Prüfmaschine. Um in der FE-Rechnung möglichst genaue Kennwerte verwenden zu können, werden aus den gleichen Stahlplatten, aus denen die Prüfkörper herausgearbeitet werden, auch Zugproben gefertigt. Mit diesen wird die Arbeitslinie unter einachsiger Zugkraft bestimmt. Diese wird für eine Anwendung in Ansys angepasst und als multilineare Materialkennlinie verwendet. Zusätzlich werden mit dem Tangentenmodul bilineare Materialkennlinien erstellt und in Vergleichsrechnungen genutzt. Die aus dem Zugversuch resultierende Ingenieurskennlinie wird in eine wahre Kennlinie umgerechnet. In den Versuchsnachrechnungen werden beide Kennlinien verwendet und verglichen.

Der für die Prüfkörper in den Versuchsphasen II bis IV verwendete Beton war der selbstverdichtende Hochleistungsbeton Ultralith der Firma Drössler Bauunternehmung aus Siegen sowie der selbstverdichtende Hochleistungsbeton Betec der Firma GCP Germany GmbH aus Essen. Die Arbeitslinien beider Betone verlaufen nahezu linear bis zum Bruch. Die Materialkennlinien für die FE-Berechnungen werden aus Druckprüfungen an Zylindern und Referenzprismen bestimmt. In Ansys werden diese als linear-elastische Materialkennlinie abgebildet.

Die Fertigung der Stahlprüfkörper wird mit Wasserstrahlschneiden hergestellt. Zunächst wird ein Prototyp mit der Zahngeometrie GT3 gefertigt, die Prüfkörper mit der Zahngeometrie GT5 und GT7 (vgl. Tab. 3.3). Die drei Verzahnungen haben eine unterschiedliche Größe. Es zeigt sich, dass die kleineren Zähne weniger genau gefertigt werden können. Dabei ist ein Unterschied zwischen der genauer gefertigten Wasserstrahleintrittsseite und der ungenaueren Wasserstrahlaustrittsseite zu erkennen. Der Grund dafür ist, dass der Wasserstrahl beim Durchdringen des Werkstücks zerstäubt wird und somit die Schnittdicke vergrößert.

Anhand eines Ingenieurmodells werden der Kraftfluss sowie die Pressungen an den Zähnen beschrieben und damit die Funktionsweise der Verbindung erläutert. An einem physikalisch linearen und geometrisch nichtlinearen FE-Modell mit zwei aufeinanderliegenden Zahnleisten wird der Kraftfluss

durch Spannungsvektoren dargestellt. Mit diesen wird der Kraftfluss über ein Stabwerkmodell interpretiert und dieses analytisch beschrieben. Weiterhin werden in einer Parameterstudie die Vergleichsspannungen entlang der Verzahnung gemessen und aufgezeigt. Dabei sind bei allen untersuchten Einflüssen drei Bereiche zu erkennen. Entlang der ersten vier Zähne am Zahnleistenanfang steigen die Belastungen an („steigender Bereich“), bevor diese über den Großteil der Leiste konstant bleiben („konstanter Bereich“). Am Zahnleistenende nehmen die Belastungen entlang von vier Zähnen ab („fallender Bereich“). Die angreifende Gesamtkraft kann für diese Bereiche prozentual aufgeteilt werden. Abschließend werden die Pressungen am Zahn untersucht. Die Pressungen am Zahn können ebenfalls in drei Bereiche aufgeteilt werden. Den Flankenkopf, die Flanke und den Flankenfuß. An der Flanke sind zwei Bereiche mit Pressungsspitzen festzustellen. Diese sind auf das Phänomen ähnlich der Hertz'schen Pressungen zurückzuführen. Zwischen den Pressungsspitzen liegt ein Bereich mit niedrigeren Pressungen. Der Verlauf der Pressungen kann über drei Trapeze abgebildet werden. Diese können jeweils über eine lineare Funktion beschrieben werden. Damit ist es möglich, die Pressung in den einzelnen Bereichen zu integrieren. Die gesamte Pressung entspricht dem Anteil der Gesamtkraft am einzelnen Zahn. Um die Pressungen an der Zahnflanke analytisch zu berechnen, wird je Teilbereich eine Formel hergeleitet. Somit ist es möglich, die Pressung an einen beliebigen Punkt x an der Zahnflanke vereinfacht zu berechnen. Alternativ können die Pressungen in drei konstante Teilbereiche Kopf, Flanke und Fuß aufgeteilt werden. Beide genannten Berechnungsansätze sind beim Verfahren Elastisch-Elastisch anzuwenden. Für das Verfahren Elastisch-Plastisch wie es für statische Beanspruchungen vorgestellt wird, wird die Pressung konstant entlang der gesamten Zahnflanke angesetzt. Weiter werden die Spannungen am Zahnfuß berechnet und diese Ergebnisse mit denen der Zahnflanke diskutiert. Dabei zeigt sich, dass der Zahnfuß bei der Spannungsberechnung maßgebend wird.

Abschließend wird ein Bemessungsvorschlag für die Stahlverzahnung sowie für die Verbindung vorgestellt. Für die Verbindung wird ein allgemeiner Bemessungsvorschlag beschrieben. Dieser wird für die Konsole und den Fachwerkknoten konkretisiert.

Zum weiteren Forschungsbedarf können folgende Themenbereiche genannt werden:

- a) Um das Anwendungsgebiet auf den Brückenbau zu erweitern, werden Untersuchungen zur Ermüdung der Stahlzahnleiste empfohlen.
- b) Zu weiteren Anwendungen wie der kragarmartigen Konsole und des Träger-Stützen-Anschluss sind numerische und experimentelle Untersuchungen wünschenswert. Anhand dieser soll das allgemeine Bemessungskonzept auf der Grundlage weiterer Anwendungen untersucht und ggf. erweitert werden.
- c) Es ist zu untersuchen, wie sich die Verformung der Konsole über die Zeit entwickelt und welcher Einfluss dadurch auf das Trag- und Verformungsverhalten der Konsole entsteht. Die Lasteinleitungsbereiche und der Druckknoten (Betondruckstrebe an der Zahnleiste) können Kriechverformungen erfahren und dadurch das Last-/Verformungsverhalten beeinflussen.
- d) Die Erkenntnisse aus c) sind für die weiteren Anwendungsgebiete (Knotenpunkt, kragarmartige Konsole, Träger-Stützen-Anschluss) etc. anzuwenden. Dabei ist zu überprüfen ob weitere Untersuchungen an diesen Konstruktionen notwendig sind oder ob die Erkenntnisse ausreichen.
- e) Durch weitere Parameterstudien ist es möglich die Datenbasis der Einflüsse für das Ingenieurmodell zu erweitern.

Es ist wünschenswert, das Produkt in der Praxis einzusetzen und für dieses einen Verwendbarkeitsnachweis (bauaufsichtliche Zulassung) zu erhalten, zum Beispiel durch ein Zulassungsverfahren beim Deutschen Institut für Bautechnik (DiBt) in Berlin. Ziel ist dabei die Allgemeine bauaufsichtliche Zulassung für dieses Produkt zu erhalten. Dem DiBt sind der aktuelle Kenntnisstand inklusive aller durchgeführten Versuche und Auswertungen sowie das Ingenieurmodell und der Bemessungsansatz mitzuteilen. Außerdem ist in einer Stellungnahme darzulegen, welche zusätzlichen Untersuchungen vorgesehen sind.

Aus Sicht des Autors sind für eine allgemeine bauaufsichtliche Zulassung weitere Versuche im Maßstab 1 zu 1 erforderlich, um die Datenbasis der aufnehmbaren Traglasten zu erweitern.

Abkürzungen

<i>DMS</i>	Elektrische Widerstands-Dehnungsmessstreifen
<i>FEM</i>	Finite-Element-Methode
<i>HPC</i>	High performance concrete
<i>IWA</i>	Induktiver Wegaufnehmer
<i>RPC</i>	Reactive Powder Concrete
<i>UHFB</i>	Ultra-hochfester Beton
<i>UHPC</i>	Ultra high performance concrete

Kleinbuchstaben

a, b, c	Koeffizienten der Funktion 2. Grades
a_1	Abstand Gewindestange zum Schwerpunkt Zahnleiste
a_2	Abstand Gewindestange zum Schwerpunkt obere Druckplatte
a_c	Abstand Lasteinleitung zur Stütze bei Konsole
b	Breite (Versuchskörper)
b_{Ko}	Breite Konsole
b_p	Breite des Prüfkörpers
b_{ref}	Breite des Referenzkörpers
b_z	Zahnbreite
d	Durchmesser
d_c	Statische Höhe Konsole
d_{Ko}	Statische Höhe (Schwerpunkte obere Stahlplatte zu Zahnleiste)
e	Ausmitte
f_c	Betondruckfestigkeit
$f_{c,cube,100}$	Würfeldruckfestigkeit Henze
f_{cd}	Designwert der Betondruckfestigkeit
f_{cm}	Mittlere Betondruckfestigkeit
f_{ct}	Betonzugfestigkeit
$f_{p0,1k}$	0,1% Dehngrenze bei Spannstahl
f_{pk}	Charakteristische Zugfestigkeit bei Spannstahl
$f_{tk,cal}$	Charakteristische Zugfestigkeit bei Stahl
f_{yk}	Charakteristische Streckgrenze bei Stahl
h	Höhe (Versuchskörper)
h_c	Konsolhöhe
h_D	aktivierte Höhe der Druckstrebe
h_{Ko}	Höhe Konsole
h_z	Zahnhöhe
$h_{z,a}$	Aktivierte Zahnhöhe
h_{ze}	Höhe Kraftangriff am Zahn
k_i	Faktor zur Berücksichtigung der Kraftverteilung auf die Teilbereiche der Zahnflanke
k_j	Faktor zur Berücksichtigung der Kraftverteilung auf die Zähne
l	Länge (Versuchskörper)
l_0	Ausgangslänge
l_Z	Länge des Zahngrund
m	Steigung
n, n_Z	Anzahl, Anzahl der aktivierten Zähne
n_f	Normalkraftverlauf
n_{ref}	Anzahl der Zahnreihen im Referenzkörper
n_{theor}	Anzahl der theoretisch vorhandenen Zahnreihen
n_{vorh}	Anzahl der tatsächlich vorhandenen Zahnreihen
p	Pressung

q	Verkehrslast als Flächenlast
$p_{H,dyn}$	Aufnehmbare dynamische Hertz'sche Pressung
$p_{H,stat}$	Aufnehmbare statische Hertz'sche Pressung
q_{SZ}	Aufnehmbare Last je Zentimeter Stahlzahn
r_1	Zahngrundradius
r_2	Zahnkopfausrundung
s_{ij}	Spannungsdeviator
t	Tiefe (Versuchskörper)
t	Achsenabschnitt
t_F	Dicke der Mörtelfuge
t_{Ko}	Tiefe Konsole
t_P	Tiefe des Prüfkörpers
t_{St}	Tiefe Stütze
u	Elementlänge
v_f	Schubkraftverlauf
w	Verformung [mm]
x	Länge
x	Anteil der aktivierten Zahnfläche [%], Hebelarm zwischen Gewindestange und unterster Verzahnung Stahl/Stahl, Verformung
d_2	Flankendurchmesser des Gewindes
d_k	wirksamer Reibungsdurchmesser

Großbuchstaben

A	Fläche
A, A_{40}	Bruchdehnung
A_0	Ausgangsfläche
A_{eff}	Effektive Fläche
A_g	Gleichmaßdehnung
A_S	Stahlquerschnitt
A_t	Gesamte Dehnung bis Bruch
A_{V1}	Auflagerkraft Konsole obere Lastplatte vertikal
A_{V2}	Auflagerkraft Konsole Zahnleiste vertikal
C	Druckkraft im Stabwerkmodell
E	Elastizitätsmodul
E	Einwirkung
$E_{T,Bruch}$	Tangentenmodul „Bruch“
$E_{T,Zugfestigk.}$	Tangentenmodul „Zugfestigk.“
F	Kraft sowie Fließbedingung
F_B	Kraft des Betonquerschnitt
F_{BS}	Kraft der Verzahnung Beton - Stahl
F_{D1}	Auflagerkraft Konsole obere Lastplatte horizontal
F_{D2}	Auflagerkraft Konsole Zahnleiste horizontal
F_{Ed}	Einwirkende Bemessungskraft
F_H	Horizontale Kraftkomponente auf Zahnleiste
F_{II}	Kraftangriff parallel zur verzahnten Fuge
F_N	Normalkraft in der Reibungsfuge
F_N	Normalkraft in der Reibungsfuge
$F_{p,C}^*$	Regelvorspannkraft
F_{Rd}	Schubkraft in der Fuge
$F_{rechtw.}$	Kraftangriff senkrecht zur verzahnten Fuge
F_{res}	Resultierende Kraft
F_{SS}	Kraft der Verzahnung Stahl – Stahl
F_T	Tangentialkraft in der Reibungsfuge
F_T	Tangentialkraft

F_{test}	Bruchlast aus Versuch
F_{Bruch}	
$F_{test,red}$	Reduzierte Bruchlast aus Versuch ohne Einfluss aus Reibung
F_V	Vertikale Kraftkomponente auf Zahnleiste
F_Z	Kraft auf linke Zahnflanke
$F_{Z,Gew.}$	Zugkraft in der Gewindestange
F_{ZN}	Normalkraft an der Zahnflanke
F_{ZR}	Reibkraft an der Zahnflanke
F_{Zug}	Zugkraft in der Gewindestange
G	Schubmodul
H	Horizontalkraft
H_1	Zahnleistenhöhe
J_2	zweite Invariante
L	Länge (Zahnleistenlänge)
$L_{Z,Kraft}$	Kraftangriffslänge an Zahnflanke
M	Moment
M_A	Anziehmoment
N	Normalkraft
N_{Ed}	Bemessungsnormalkraft senkrecht zur Fuge
P	Vorspannkraft
Q	Verkehrslast als Einzellast
R	Radius
R	Widerstand
R_{eH}	Obere Streckgrenze
R_{eL}	Untere Streckgrenze
R_m	Zugfestigkeit Stahl
$R_{p0,2}$	Streckgrenze mit 0,2% plastischer Dehnung
T	Tiefe (Zahnleistentiefe)
T	Zugkraft im Stabwerkmodell
V	Vertikalkraft
$V_1 \text{ bis } V_6$	Versuch 1/2/3/4/5/6
W	Widerstandsmoment
W_G	Gestaltänderungsenergie
F_{VM}	Montagevorspannkraft der Schraube

Griechische Buchstaben

α_{cc}	Faktor zur Berücksichtigung von Langzeiteinwirkungen bei Beton
α_e	Dehnungsfaktor
α_H	Hooke'scher Kerbfaktor
α_T	Temperaturausdehnungskoeffizient
α_σ	Spannungskerbfaktor
α_Z	Neigung der Zahnflanke
β	Kraftangriffswinkel an der Zahnleiste
γ	Teilsicherheitsbeiwert
γ_c	Teilsicherheitsbeiwert für Beton
γ_c'	Zusätzlicher Teilsicherheitsbeiwert für UHPC
γ_s	Teilsicherheitsbeiwert für Stahl
ε	Dehnung
ε_{Ing}	Ingenieurdehnungen
ε_{Wahr}	Hencky-Dehnungen
θ	Druckstrebenneigungswinkel, Winkel unter dem die Kraft auf den Zahn trifft
μ	Reibungsbeiwert
ν	Querdehnzahl sowie Abminderungsbeiwert für Betonfestigkeiten im Knoten
ξ	Winkelspektrum der destabilisierenden Kraft

ρ	Dichte
σ	Spannung
$\sigma_{1,2,3}$	Hauptspannungen
σ_F	Fließbedingung
σ_{Ing}	Ingenieurspannungen
σ_{max}	Spannungsmaximum
σ_M	Spannung aus Moment
σ_N	Spannung aus Normalkraft
σ_V	Vergleichsspannung
σ_{Wahr}	Wahre Spannungen
$\dot{\sigma}_n$	Hooke'sche Ersatzspannung im Bauteil
$\dot{\sigma}_{max}$	Maximale Hooke'sche Ersatzspannung im Kerbbereich
τ	Schubspannung
ψ	Winkelspektrum der stabilisierenden Kraft
Δ	Versatz, Differenz
Δ_{bz}	Zusatzmaß der Zahnleiste in der Breite
ΔF_Z	Zusätzliche Kraft auf rechte Zahnflanke
Δx	Teillänge
Ω	Nennwiderstand

Nicht aufgeführte und alternative Bezeichnungen sind im Text erläutert.

Quellenverzeichnis

Verzeichnis der verwendeten Literatur

Abdul-Wahab 1989

Abdul-Wahab, H. M. S.: Strength of Reinforced Concrete Corbels with Fibres. ACI Structural Journal, 1987, vol. 86, Nr. 1, S. 60-66

Albers 2007

Albers, A.: Kupplungen und Bremsen. In: Steinhilper, Sauer (Hrsg.), Konstruktionselemente des Maschinenbaus 2 – Grundlagen von Maschinenelementen für Antriebsaufgaben, 6. Auflage, Verlag Springer, Berlin, Heidelberg, 2007, S. 295-297

Al-Sabah 2016

Al-Sabah, S.: Dealing with tolerances in the AMASS connection, UCD Dublin, unveröffentlicht, 2016

Ansys 2018

Ansys: Benutzerhandbuch 2018

Andrä 1985

Andrä H.-P.: Neuartige Verbindungsmittel für den Anschluss von Ortbetonplatten an Stahlträger. Beton- und Stahlbetonbau. Band 80. Heft 12, 1985. S. 325-328

Bauforumstahl 2012

Bauforumstahl: Arbeitshilfe 1.1, Stahlherstellung und Werkstoffe für den Stahlbau, überarbeitete Auflage 3/2012

Birkle et al. 2001

Birkle, G.; Dilger, W.; Ghali, A.; Schäfer, K.: Doppelkopfstäbe in Konsolen. Laborversuche und Bemessung. Beton- und Stahlbetonbau 96,2 1001, Heft 2, S. 82 - 89.

Bobeth 1993

Bobeth, W.: Textile Faserstoffe: Beschaffenheit und Eigenschaften, Verlag Springer, Berlin 1993

Chakrabarti et al. 1987

Chakrabarti, P. R.; Farahani, D. J.; Kashou, S. I.: Reinforced and Precompressed Concrete Corbels – An Experimental Study. ACI Structural Journal, 1989, vol. 86, Nr. 4, S. 405-412.

DAfStb. 2012

Deutscher Ausschuss für Stahlbeton e.V.: Heft 600: Erläuterungen zu DIN EN 1992-1-1 und DIN EN 1992-1-1/NA (Eurocode 2), 1. Auflage, Verlag Beuth GmbH, Berlin, Wien, Zürich, 2012

DAfStb. 2008

DAfStb Sachstandsbericht UHFB, 2008

Dehlinger 2004

Dehlinger, C; Stählerne Verzahnungen für Stahlbetonkonstruktionen; Dissertation, Fakultät Bau- und Umweltingenieurwissenschaften der Univ. Stuttgart; 2004

DNV 2013

Det Norske Veritas AS: Determination of Structural Capacity by Non linear FE analysis Methods; Norway 2013

Eibl 1990

Eibl, J.; Bachmann, H.: Nachträgliche Verstärkung von Stahlbetonbauteilen mit Spritzbeton. Beton- und Stahlbetonbau 85 (1990), H.1, S. 1-4. H.2, S.39-44

Eibl/Zeller 1983

Eibl, J.; Zeller, W.: Bruchversuche an Stahlbetonkonsolen bei Veränderung des Bewehrungsgrades. Abschlussbericht, Universität Karlsruhe, 1983.

Eibl/Zeller 1993

Eibl, J.; Zeller, W.: Untersuchungen zur Traglast der Druckdiagonalen in Konsolen. Beton- und Stahlbetonbau 88,19 193, Heft 1, S. 23-26.

Eligehausen/Gerster 1993

Eligehausen, J.; Gerster, R.: Das Bewehren von Stahlbetonbauteilen. Erläuterungen zu verschiedenen gebräuchlichen Bauteilen, DAfStb, Heft 399, Verlag Beuth, 1993

Empelmann et al. 2014

Empelmann, M; Busse, D.; Hamm, S.; Zedler, T.; Girmscheid, M.: Adaptive ‚Tube-in-Tube‘-Brücken; Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen, Brücken und Ingenieurbau, Heft B 102, 2014

Ettemeyer, Olbrich 2007

Ettemeyer, A.; Olbrich, O.: Konstruktionselemente, Kapitel 6: verschiedene Verbindungen, Fachhochschule München, Fachbereich 06, Feinwerk- und Mikrotechnik, Version 3.02, 2007

Falter et al. 2018

Falter, H.; Schmid, V.; Schmidt, J.; Nettekoven, T.; Entwicklung eines modularen Fachwerkträgers aus HPC-Fertigteilen und gezahnten Hochleistungs-Verbindungsdetails; Forschungsbericht Hochschule Coburg/TU Berlin; 2018

Fattuhi et al. 1989

Fattuhi, N.I., Hughes, B. P.: Ductility of Reinforced Concrete Corbels Containing either Steel Fibres or Stirrups. ACI Structural Journal, 1989, vol. 86, Nr. 6, S. 644-651.

Fattuhi 1990

Fattuhi, N. I.: Strength of SFRC Corbels Subjected to Vertical Load. Journal of Structural Engineering ASCE 1990, vol. 116, Nr. 3, S. 701-718.

FB Univ. Karlsruhe 1977

Forschungsbericht vom Lehrstuhl für Ingenieurholzbau und Baukonstruktion der Universität Karlsruhe, 1977, in: Schneider Bautabellen, Auflage 22

Fehling et al. 2005

Fehling, E.; Schmidt, M.: Entwicklung, Dauerhaftigkeit und Berechnung Ultrahochfester Betone (UHPC) – Forschungsbericht DFG FE 497/1-1; Schriftenreihe der Universität Kassel. 2005

Fingerloos, Stenzel 2007

Fingerloos, F.; Stenzel, G.: Konstruktion und Bemessung von Details nach DIN 1045, in: Betonkalender 2007, Teil 2, Verlag Ernst & Sohn, Berlin, 2007

Fischer et al. 2014

Fischer, O.; Lechner, T.; Mensinger, M.; Ndogm J.; Seidl G.; Stambuk M.: Entwicklung dünnwandiger, flächenhafter Konstruktionselemente aus UHPC und geeigneter Verbindungstechniken zum Einsatz im Hoch- und Industriebau; Abschlussbericht F 2912; 2014

Foster/Powell/Selim 1996

Foster, S. J.; Powell, R. E.; Selim, H. S.: Performance of High-Strength Concrete Corbels. ACI Structural Journal, 1996, vol. 93, Nr. 5, S. 555-563.

Gabriel 1980

Gabriel, K.: Ebene Seiltragwerke, Beratungsstelle für Stahlverwendung Merkblatt 496, Düsseldorf 1980

Gruber 2011

Gruber, A.: Detailanalyse zum Tragverhalten stumpf gestoßener Verbindungen in UHPC-Fachwerkkonstruktionen, Masterarbeit, TU Graz, 2011

Grünberg, Göhlmann 2011,

Grünberg, J.; Göhlmann, J.: Windenergieanlagen in Stahlbeton- und Spannbetonbauweise, in: Bergmeister, K. (Hrsg.); Fingerloos, F. (Hrsg.); Wörner, J. (Hrsg.): Betonkalender 2011, Teil 1: Kraftwerke, Verlag Ernst & Sohn, Berlin, 2011

Gründel et al. 2009

Gündel, M.; Dürr, A.; Hauke, B.; Hechler, O.: Zur Bemessung von Lochleisten als duktile Verbundmittel in Verbundträgern aus höherfesten Materialien. Stahlbau, Ernst und Sohn Verlag, 2009, S. 916-924

Hagberg 1966

Hagberg, T.: Zur Bemessung der Konsole, in: Beton- und Stahlbetonbau, Heft 3, S. 63 – 72, Verlag Ernst & Sohn, Berlin, 1966

Hagberg 1983

Hagberg, T.: Design of Concrete Brackets: On the Application of the Truss Analogy. ACI-Journal 80 (1983), No. 1 pp. 3 bis 12. Discuss. In: ACI-Journal 80 (1983), p. 540.

Hauke 2007

Hauke, B.: Aperture plates as ductile shear connectors for high performance composite members. Symposium on Connections between steel and concrete, Stuttgart 2007

Hegger et al. 2004

Hegger, J.; Roeser, W.; Lotze, D.: Kurze Verankerungslängen mit Rechteckankern. Beton- und Stahlbetonbau 99,2 1004, Heft 1, S. 1 - 9.

Henze 2009

Henze, S.: Entwicklung und Beschreibung des Tragverhaltens einer modularen Fachwerkkonstruktion aus Hochleistungsbeton, Dissertation, Universität Leipzig, 2009

Hertz 1881

Hertz, H.: Über die Berührung fester elastischer Körper, in: Journal für die reine und angewandte Mathematik 92, S. 156-171, Berlin, 1881

Hofmann 2015

Hofmann, K.: Experimentelle Versuchsdurchführung an Hochleistungsverbindungsdetails im Stahlbetonfertigteiltbau; Masterthesis; Koblenz 2017, unveröffentlicht

HTA Association k. A. (keine Angabe)

HTA Association: Honeycomb tube architecture technology. Tokio: Shinken-chiku-Sha, 2009

Jennewein/Schäfer 1992

Jennewein, M.; Schäfer, K.: Standardisierte Nachweise von häufigen D-bereichen, DAfStb, Heft 430, Verlag Beuth, Berlin, 1992

Juhart 2011

Juhart, J.: Adhäsion von UHPC an Stahl und Glas. Ein Beitrag zu Adhäsion und Haftfestigkeit von Hochleistungs- und Ultra-Hochleistungs-Feinkornbeton an Stahl und Glas unterschiedlicher Rauheit, Dissertation, TU Graz, 2011

Kobler 2013

Kobler M.: Ein Implantat zur Einleitung konzentrierter Lasten in Bauteile aus ultra-hochfestem Beton; Dissertation, Institut für Werkstoffe Univ. Stuttgart; 2013

Kositz 2010

Kositz, M.: Analyse von Stabwerkmodellen zur Bestimmung der Bügelbewehrung von Fertigteilkonsolen, Bachelorarbeit, BTU Cottbus, 2010

Kritz/Raths 1965

Kriz, L. B.; Raths, C. H.: Connections in Precast Concrete Structures – Strength of Corbels. PCI Journal, 1965, S. 16 - 61.

Leonhard, Mönnig 1986

Leonhardt, F.; Mönnig, E.: Vorlesungen über Massivbau, zweiter Teil. 3. Auflage, Springer Verlag, 1986

Leonhard et al. 1987

Leonhardt, F.; Andrä, W.; Andrä, H.-P.: Neues vorteilhaftes Verbundmittel für Stahlverbundbau-Tragwerke mit hoher Dauerhaftigkeit. Beton- und Stahlbetonbau. Band 82. Heft 12, 1987. S. 325-331.

Leonhard/Mönnig 1975

Leonhard, F.; Mönning, E.: Vorlesungen über Massivbau, Teil 2: Sonderfälle der Bemessung im Stahlbetonbau, 2. Auflage, Verlag Springer, Berlin, 1975

Leonhard/Mönnig 1977

Leonhard, F.; Mönning, E.: Vorlesungen über Massivbau, Teil 3: Grundlagen zum Bewehren im Stahlbetonbau, 2. Auflage, Verlag Springer, Berlin, 1977

Mangerig 2000

Mangerig, I.; Zapfe, C.: Ermüdungsfestigkeit von Betondübeln. In: „Theorie und Praxis“ im Konstruktiven Ingenieurbau. Festschrift zu Ehren von Prof. Dr.-Ing. H. Bode. Ibidem Verlag Stuttgart. 2000

Mangerig et al. 2011

Mangerig, I.; Burger, S.; Wagner, R.; Wurzer, O.; Zapfe, C.: Zum Einsatz von Betondübeln im Verbundbau (Teil 1) – Ruhende Beanspruchung; Stahlbau, 80(12);2011; S. 885-893

Mehmel/Freitag 1967

Mehmel, A.; Freitag, W.: Tragfähigkeitsversuche an Stahlbetonkonsolen. Der Bauingenieur 42,1967, Heft 10, S. 362 - 369.

Mörsch 1908

Mörsch, Emil: Der Eisenbetonbau, seine Theorie und Anwendung mit Versuchen und Bauausführungen der Firma Wayss & Freitag; 3. neu bearbeitete u. vermehrte Auflage; Verlag von Konrad Wittwer; Stuttgart 1908

Muhs et. al. 2007

Muhs, D., Wittel, H., Jannasch, D., Voßiek, J.: Roloff/Matek: Maschinenelemente: Normung, Berechnung, Gestaltung; 20. Auflage Vieweg+Teubner Verlag, 2011

Nettekoven (2019)

Nettekoven, T.: Dissertation i. V.; TU Berlin, 2019

Neuber 1968

Neuber, H.: Theoretical determination of fatigue strength at stress concentration, Rep. AFML-TR-68-20, Air Force Materials Laboratory, Wright-Patterson Air Force Base, Dayton, OH, 1968

Niederhoff 1961

Niederhoff, H.: Untersuchungen über das Tragverhalten von Konsolen und kurzen Kragarmen. Dissertation, Universität Karlsruhe, 1961.

Nissen 1987

Nissen, I.: Rissverzahnung des Betons – gegenseitige Rissuferverschiebungen und übertragende Kräfte. TU München, Dissertation, Lehrstuhl für Massivbau, 1987

Oettel 2013

Oettel, V; Empelmann, M.: Feinprofilierter UHPFRC-Trockenfugen für Segmentbauteile. Beton- und Stahlbetonbau 108 (2013), Heft 7

Petersen 2013

Petersen, C.: Stahlbau, Grundlagen der Berechnung und baulichen Ausbildung von Stahlbauten, 4. Auflage, Verlag Springer, Wiesbaden, 2013

Reineck 2005

Reineck, K. H.: Modellieren der D-Bereiche von Fertigteilen, In: Betonkalender 2005, Teil 2, Verlag Ernst & Sohn, Berlin, 2005

Reitz 2003

Reitz, D.: Grundlagen zur Bemessung der Perfobondleiste als duktiler Verbundmittel. Dissertation, TU Darmstadt, 2003

Riedelbauch 2018

Riedelbauch, H.: Untersuchung zur Herstellung und Tragfähigkeit einer vereinfachten Stahlzahngeometrie für die Krafteinleitung in Konstruktionsbeton, Bachelorthesis, unveröffentlicht, Coburg 2018

Roik, Bürkner 1978

Roik K.; Brückner, K.-E.: Reibwert zwischen Stahlgurten und aufgespannten Betonfertigteilen. Bauingenieur 53 (1978), S.37-41

Rust 2009

Rust, W.: Nichtlineare Finite-Elemente-Berechnungen - Kontakt, Geometrie, Material; Vieweg+Teuber; 1. Auflage, 2009

Ruth 1993

Ruth, J; Werkstoffverhalten in Grenzflächenbereichen der Tragelemente von Bauwerken; Institut für Tragwerksentwurf- und konstruktion der Univ. Stuttgart; Juli 1993

Scherer 2004

Scherer, M.: Kerbspannungen und Kerbformoptimierung, Dissertation, Universität Karlsruhe, 2004

Schlaich 1992

Schlaich, J.; Bergemann, R.: Fußgängerbrücken. Katalog zur Ausstellung an der ETH Zürich, 1992

Schlaich et al. 2002

Schlaich, J.; Schlaich, M.; Schmid, V.: Stahlverbundbrücken – neue Erfahrungen. Die Entwicklung von Verbindungen mit Zahnleisten, In: Bauingenieur, 77 (2002), H. 3, S. 95-107, Berlin: Ernst & Sohn

Schlaich/Schäfer 1993

Schlaich, J.; Schäfer, K.: Konstruieren im Stahlbetonbau, Sonderdruck aus dem Betonkalender 1993, Verlag Ernst & Sohn, Berlin, 1993

Schlaich/Schäfer 2001

Schlaich, J.; Schäfer, K.: Konstruieren im Stahlbetonbau, In: Betonkalender 2001, Teil 2, Verlag Ernst & Sohn, Berlin, 2001

Schmid 2000

Schmid, V; Hochbelastete Verbindungen mit Zahnleisten in Hybridtragwerken aus Konstruktionsbeton und Stahl; Institut für Tragwerksentwurf und -konstruktion der Univ. Stuttgart; 2000

Schmidt 2018

Toothed, high-performance steel interfaces for efficient force transmission between pre-cast, high-performance concrete sections; IABSE München 2018

Schneider et al. 2016

Schneider k. J.: Schneider Bautabellen. 22. Auflage.

Schöning et al. 2013

Schöning, J.; Della Pietra, R.; Hegger, J.; Tue, N. V.: Verbindungen von Fertigteilen aus UHPC. In: Bautechnik (2013) Bautechnik 90, S. 304–13.

Schürmann 1985

Schürmann, U.: Vorgespannte Schraubverbindung zur Befestigung von Stahlbetonkonsolen. Dissertation, Universität Dortmund, 1985

Schwitzke 2011

Schwitzke, M.: Zum Trag- und Verformungsverhalten von Fertigteilkonsolen, Dissertation, BTU Cottbus, 2011

Sobek 2011

Sobek, W.; Mittelstädt, J; Kobler, M.: Fügung schlanker Bauteile. Beton- und Stahlbetonbau. Band 106. Heft 11, 2011. S. 779-784

Steinle et al. 2016

Steinle, A.; Bachmann, H.; Tillmann, M.: Bauen mit Betonfertigteilen im Hochbau; Verlag Ernst & Sohn, Berlin, 2016.

Steinle et al. 2017

Steinle, A.; Bachmann, H.; Tillmann, M.: Bauen mit Betonfertigteilen im Hochbau; Verlag Ernst & Sohn, Berlin, 2017.

Steinle/Hahn 1988

Steinle, A.; Hahn, V.: Bauen mit Betonfertigteilen im Hochbau, überarb. Sonderdruck aus Betonkalender 1988; Fachvereinigung Deutscher Betonfertigteilebau e. V., 1991, S. 1-173

Steinle/Hahn 1995

Steinle, A.; Hahn, V.: Bauen mit Betonfertigteilen im Hochbau, Betonkalender 1984; Teil 2, Verlag Ernst & Sohn, Berlin, 1995, S. 459-629.

Tandler 2013

Tandler, J. M.; Experimentelle und numerische Untersuchungen an Hochleistungsverbindungen mit Zahnleisten; Fakultät - IV Planen Bauen Umwelt - TU Berlin; 2013

Tue 2013

Tue, N. V.: Modular Constructions made of UHPC, Conference paper Hokkaido University, Japan, 2013

Tue/Schneider 2003

Tue, V.; Schneider, H.: Besonderheiten bei der Bemessung und der konstruktiven Ausbildung von Bauteilen aus UHPC im Rahmen der Zulassung im Einzelfall. In der Schriftenreihe Baustoffe und Massivbau, Heft 2, Universität Kassel, 2003.

Vogt, Müller 2018

Vogt, R.; Müller, P.: Numerische Simulation; Masterthesis; Coburg 2018, unveröffentlicht

Vogt/Müller 2016

Vogt, R.; Müller, P.: Numerische Simulation von Stahlverzahnungen für Hochleistungsverbindungen im konstruktiven Ingenieurbau; Bachelorthesis; Coburg 2016, unveröffentlicht

Völkel 2016

Völkel, S.: Hochleistungsverbindungen für modulare Windkrafttürme; Bachelorthesis; Coburg 2016, unveröffentlicht

Wagner 2010

Wagner, R.: Untersuchungen zum Verbundverhalten von Betondübeln in vorwiegend ruhend und nicht ruhend beanspruchten Konstruktionen. Stahlbau, Ernst und Sohn Verlag, 2011, S. 250-255

Walraven 1978

Walraven, J.: Mechanisms of shear transfer in cracks in concrete. A survey of literature. TU Delft Report 5-78-12, 1978

Wechsler 1986

Wechsler, M. B.: Precast Concrete Trusses. Concrete International 8 (1986), . 49-54.

Willacker 2018

Willacker, C.: Entwicklung und Betrachtungen am Ingenieurmodell für eine Stahlverzahnung, Bachelorthesis; Coburg 2018, unveröffentlicht

Wörner 2017

Wörner, S.: Entwicklung eines Ingenieurmodells für eine Stahlverzahnung; Bachelorthesis; Coburg 2017, unveröffentlicht

Wurzer 1997

Wurzer, O.: Zur Tragfähigkeit von Betondübeln. Dissertation, Universität der Bundeswehr München, 1997

Xu et. al. 2014

Xu, H; Shi, T.; Zhang, Z.; Shi, B.: Loading and Contact Stress Analysis on the Thread Teeth in Tubing and Casing Premium Threaded Connection, Hindawi Publishing Corporation, Southwest Petroleum University, Chengdu, China, 2014

Zapfe 2001

Zapfe, C.: Trag- und Verformungsverhalten von Verbundträgern mit Betondübeln zur Übertragung der Längsschubkräfte. Dissertation, Universität der Bundeswehr München, 2001

Zilch/Zehetmaier 2009

Zilch, K.; Zehetmaier, G.: Bemessung im konstruktiven Betonbau, 2. Neu bearbeitete und erweiterte Auflage, Verlag Springer, 2009

Verzeichnis von Patentschriften

Halfen 2008

Patentschrift Patent DE 19952594

BTU Cottbus 2009

Offenlegungsschrift Patent DE 10200700919

D. K. Devonport 1970

Patent US 3513610 A

Patent GB2179115

Verzeichnis der verwendeten Normen

AFGC 2002

AFGC, Setra: (Association Francaise de Genie Civil) Béton fibrés à ultra-hautes performances, (Ultra high performance fibrereinforced concretes), recommandations provisoires, France, Janvier, 2002.

BS 84

Zylindrische Schraubgewinde vom Typ Whitworth, Spezifikation, British Standard 84, 2007

DIN 1045-1

DIN 1045-1: Tragwerke aus Beton, Stahlbeton und Spannbeton. Teil 1: Bemessung und Konstruktion. 2000

DIN 18800-1

DIN 18800-1:2008-11, Stahlbauten - Teil 1: Bemessung und Konstruktion

DIN 3990

DIN 3990-1:1987-12: Tragfähigkeitsberechnung von Stirnrädern; Einführung und allgemeine Einflußfaktoren

DIN EN 1990

Eurocode 0: Grundlagen der Tragwerksplanung; Deutsche Fassung EN 1990:2002 + A1:2005 + A1:2005/AC:2010

DIN EN 1991-1

DIN EN 1992-1-1:2011-01

Eurocode 1: Einwirkungen auf Tragwerke - Teil 1-1: Allgemeine Einwirkungen auf Tragwerke - Wichten, Eigengewicht und Nutzlasten im Hochbau; Deutsche Fassung EN 1991-1-1:2002 + AC:2009

DIN EN 1992-1-1

Eurocode 2: Bemessung und Konstruktion von Stahlbeton- und Spannbetontragwerken – Teil 1-1: Allgemeine Bemessungsregeln und Regeln für den Hochbau, Verlag Beuth, 2010

DIN EN 1993-1-8

Eurocode 3: Bemessung und Konstruktion von Stahlbauten - Teil 1-8: Bemessung von Anschlüssen; Deutsche Fassung EN 1993-1-8:2005 + AC:2009

DIN EN 1994

DIN EN 1994-1-1:2010-12, Eurocode 4: Bemessung und Konstruktion von Verbundtragwerken aus Stahl und Beton - Teil 1-1: Allgemeine Bemessungsregeln und Anwendungsregeln für den Hochbau; Deutsche Fassung EN 1994-1-1:2004 + AC:2009

DIN EN 12390-13

Prüfung von Festbeton - Teil 13: Bestimmung des Elastizitätsmoduls unter Druckbelastung (Sekantenmodul); Deutsche Fassung EN 12390-13:2013

DIN EN ISO 9013

Thermisches Schneiden - Einteilung thermischer Schnitte - Geometrische Produktspezifikation und Qualität (ISO 9013:2017); Deutsche Fassung EN ISO 9013:2017

DIN EN ISO 6892-1

Metallische Werkstoffe - Zugversuch - Teil 1: Prüfverfahren bei Raumtemperatur (ISO 6892-1:2016); Deutsche Fassung EN ISO 6892-1:2016

DIN 103

Metrisches ISO-Trapezgewinde, 1977

DIN 50125

Prüfung metallischer Werkstoffe - Zugproben

DIN 976-1 Gewindestangen:2016-09

Mechanische Verbindungselemente - Gewindebolzen - Teil 1: Metrisches Gewinde

ACI 318-14, 2014

American Concrete Institute (ACI) Committee 318: Building Code Requirements for Structural Concrete (ACI 318-14) / Commentary on Building Code Requirements for Structural Concrete (ACI 318R-14), Farmington Hills, MI: ACI, 2014

Verzeichnis von Firmeninformationen

AquaContour GmbH 2017

Video per Mail erhalten am 29.08.2017

Halfen 2011

Halfen HCC Stützenschuh - Produktinformation Technik; 2011

Halfen 2016

Halfen HSC Stud Connector – Produktinformation; 2016

HolTech GmbH & Co. KG 2017

HolTech Antriebstechnik GmbH & Co. KG, Schloß Holte-Stukenbrock; Bild: Zahnräder; per Mail zugesandt am 14.08.2017

Max Bögl

Max Bögl, Baupraktische Anwendung Hochfester Betone – Produktion von Fertigteilen für Windenergieanlagen; Interne Präsentation innerhalb des Forschungsprojektes SWD-10.08.18.7-15.19

Voith GmbH: 2016

Bilder per Mail erhalten am 24.02.2016

Verzeichnis von Verwendbarkeitsnachweisen

Halfen 2017

Zulassungsbescheid Z-21.08-1973: Halfen Stud Connector HSC. Allgemeine bauaufsichtliche Zulassung des DIBt; Berlin; 2017

Verzeichnis der verwendeten Informationen aus dem Internet

Schaeffler Technologies AG & Co. KG

Stützrollen – Konstruktions- und Sicherheitshinweise unter:

http://medias.ina.de/medias/de!hp.info/NATV*UK*kshinweise;aVmhedtqb6fb#ST4_77357067

Eingesehen am 25.01.2016

Verzeichnis der Interviewquellen

Kapp Niles 2018

Interview mit Kapp Niles, durchgeführt am 27.12.2017 von Riedelbauch H.; In: Untersuchung zur Herstellung und Tragfähigkeit einer vereinfachten Stahlzahngeometrie für die Krafteinleitung in Konstruktionsbeton, Bachelorthesis, unveröffentlicht, Coburg 2018

Verwendete Computer-Programme

Ansys

Ansys Workbench Version 16.2

Ansys Inc, Canonsburg, Pennsylvania, USA

FriLo

Version 4.2016

Friedrich und Lochner Software GmbH, Stuttgart, Deutschland

Sofistik

Sofoplus x 2016

Sofistik AG, Bruckmanning, Deutschland

AutoCAD

AutoCad 2015

Autodesk AG, San Rafael, Kalifornien, USA

Allplan

Allplan 2015

Allplan Deutschland GmbH, München, Deutschland

Weitere Hinweise

Darstellungen, Tabellen und Bilder ohne Quellenangabe sind vom Autor bzw. in enger Zusammenarbeit mit studentischen Mitarbeitern entstanden. Mein besonderer Dank gilt dabei Herrn Kai Hofmann M.Eng., Herrn Rafael Vogt M.Eng., Herrn Philipp Müller M.Eng. und Herrn Christoph Schubert M.Eng.

Diese Dissertation gehört zum Themenbereich des Forschungsprojektes „Entwicklung eines modularen Fachwerkträgers aus HPC-Fertigteilen und gezahnten Hochleistungs-Verbindungsdetails“, SWD-10.08.18.7-15.19. Während im Forschungsbericht der Fokus auf der Entwicklung des modularen Fachwerkträgers liegt, ist die Entwicklung der Hochleistungsverbindung der Kern dieser Arbeit. Als dritte Arbeit zu den genannten Themenbereichen ist die Entwicklung von Betonverzahnungen zur Kraftübertragung zwischen Stahlbetonfertigteilen zu nennen, die in Nettekoven (2019) beschrieben sind.

Eidesstattliche Versicherung

Hiermit erkläre ich, die vorliegende Arbeit selbstständig und ohne fremde Hilfe verfasst zu haben. Benutzte Hilfsmittel, Quellen und Zitate sind ausdrücklich als solche gekennzeichnet.

Coburg/Berlin, den 12.05.2019

Jonas Schmidt

Lebenslauf

Jonas Schmidt
Verheiratet, drei Kinder

10/2015 – heute	Berufsbildungs- und Technologiezentrum/HWK für Oberfranken Dozent für Mechanik im Meisterkurs Gerüstbau
08/2012 – heute	Ingenieurgruppe Knörnschild und Kollegen, Coburg Tragwerksplaner, Projektleiter, Sachgebietsleiter Holzbau Beratender Ingenieur, Nachweisberechtigter f. Standsicherheit, Bauvorlage- berechtigter
06/2015 – heute	Wissenschaftlicher Mitarbeiter und Lehrkraft für besondere Aufgaben an der Hochschule Coburg/Doktorand an der TU Berlin
04/2011 – 07/2012	Studium Bauingenieurwesen an der Universität Kassel Vertiefung: Baustatik, Holzbau, Massivbau Abschluss: Master of Science (M. Sc.)
03/2012	Universität Kassel / BG Bau Kassel Weiterbildung zum Sicherheits- und Gesundheitsschutzkoordinator nach RAB 30, Anlage C
04/2011 – 11/2011	Institut für konstruktiven Ingenieurbau der Universität Kassel Mitarbeit am Forschungsprojekt “Optimization of Timber Multistorey Build- ing against Earthquake impact”
10/2007 – 03/2011	Studium des Bauingenieurwesens an der Hochschule Würzburg Abschluss: Bachelor of Engineering (B. Eng.)
10/2008 – 12/2008	Hochschule Würzburg / BG Bau Nürnberg Sicherheitstechnische Ausbildung nach RAB 30, Anlage B
08/2009 – 01/2010	Bilfinger Berger AG / Julius Berger Nigeria PLC Auslandspraktikum in Nigeria, Afrika Assistenz der Bauleitung für Großprojekt im Straßen- und Brückenbau
12/2008 – 08/2009	Hochschule Würzburg
02/2010 – 03/2011	Fachtutor für Technische Mechanik und Tragwerke
01/2008 – 07/2009	Ingenieurbüro Albrecht & Partner, Würzburg
03/2010 – 01/2011	Studentischer Mitarbeiter
02/2011 – 03/2011	Tragwerksplaner
09/2005 – 07/2007	Staatliche Fachschule für Bautechnik, Kulmbach Abschluss: Staatlich geprüfter Bautechniker
09/2005 – 07/2006	Handwerkskammer für Oberfranken, Bayreuth Ausbildung der Ausbilder (AdA)
09/2003 – 09/2005	Holz + Bau Zschach GmbH, Ludwigsstadt Zimmerergeselle
09/2000 – 08/2003	Holz + Bau Zschach GmbH, Ludwigsstadt Ausbildung zum Zimmermann

Anhang

Anhang	1
Anhang A: zu Kapitel 3 – Entwicklung der Stahlzahngeometrie	2
Anhang B: Materialkennwerte	8
Anhang B1: Materialkennwerte Stahl	8
Ermittlung der Materialkennwerte des Stahls	8
Ergebnisse der Zugversuche zur Ermittlung der Materialkennwerte des Stahls	9
Materialkennwerte für die Simulation in Ansys	11
Anhang B2: Materialkennwerte Beton	13
Allgemeines	13
Probekörper	13
Anhang C: Dokumentation Versuche	21
Anhang C1: Dokumentation Versuche Phase I	21
Anhang C2: Dokumentation Versuche Phase II	36
Anhang C3: Dokumentation Versuche Phase III	66
Anhang C4: Dokumentation Versuche Phase IV	98
Anhang D: Pläne	112
Anhang D1: Pläne Prüfkörper Phase I	112
Anhang D2: Pläne Prüfkörper Phase II	121
Anhang D3: Pläne Prüfkörper Phase III	129
Anhang D4: Pläne Prüfkörper Phase IV	132
Anhang D5: Pläne Widerlager für Phase III	137
Anhang D6: Pläne Widerlager Phase IV	138
Anhang D7: Zahngeometrie	139
Anhang E: Zum Ingenieurmodell aus Kapitel 8	143
Anhang E1: Studie – Prozentuale Verteilung der Spannungen entlang der Verzahnung für den reibungsfreien Ansatz	143
Anhang E2: Studie – Prozentuale Verteilung der Spannungen entlang der Zahnflanke für den reibungsfreien Ansatz	143
Anhang E3: Studie – Steigung m der Flankenbereiche für reibungsfreien Ansatz	145
Anhang E4: Studie – Prozentuale Verteilung der Spannungen entlang der Verzahnung für den reibungsbehafteten Ansatz	146
Anhang E5: Studie – Prozentuale Verteilung der Spannungen entlang der Zahnflanke für den reibungsbehafteten Ansatz	146
Anhang E6: Studie – Steigung m der Flankenbereiche für reibungsbehafteten Ansatz	146
Anhang F: Vermessung der Stahlzähne I/P1 bis I/P4	147
Anhang F1: Vermessung mithilfe eines Stereomikroskops	147
Anhang F2: Auswertung der Vermessungen	157
Anhang G: Versuchsdatenbank	169

Anhang A: zu Kapitel 3 – Entwicklung der Stahlzahngeometrie

Spannungsverteilung in Abhängigkeit der Geometrie bei Lagersituation 1

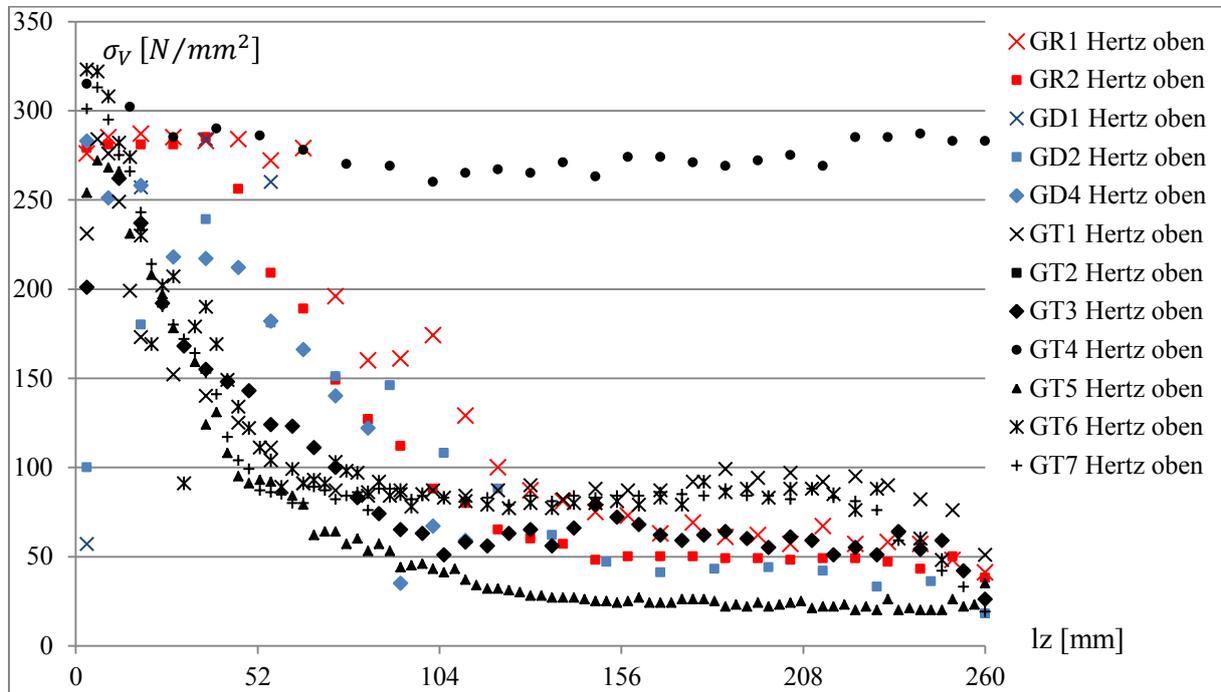


Abb. A1.1: Spannungsverteilung an den Zähnen in Abhängigkeit der Geometrie bei Lagersituation 1 an Messbereich 1

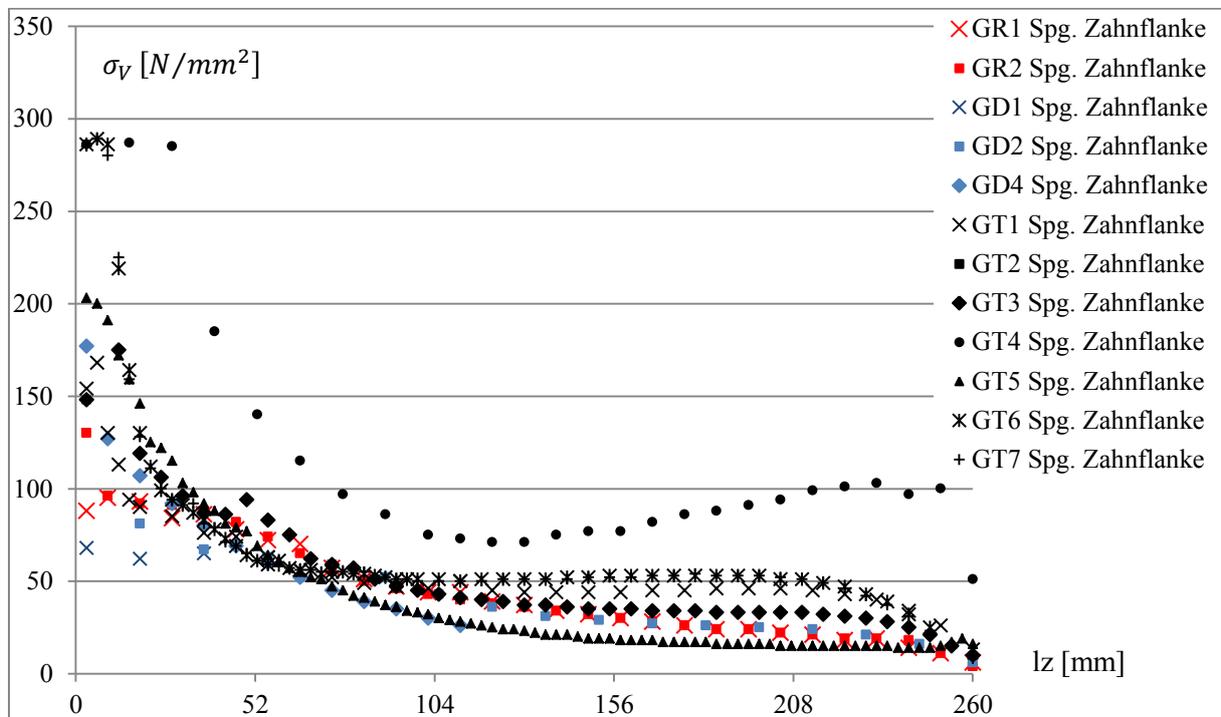


Abb. A1.2: Spannungsverteilung an den Zähnen in Abhängigkeit der Geometrie bei Lagersituation 1 an Messbereich 2

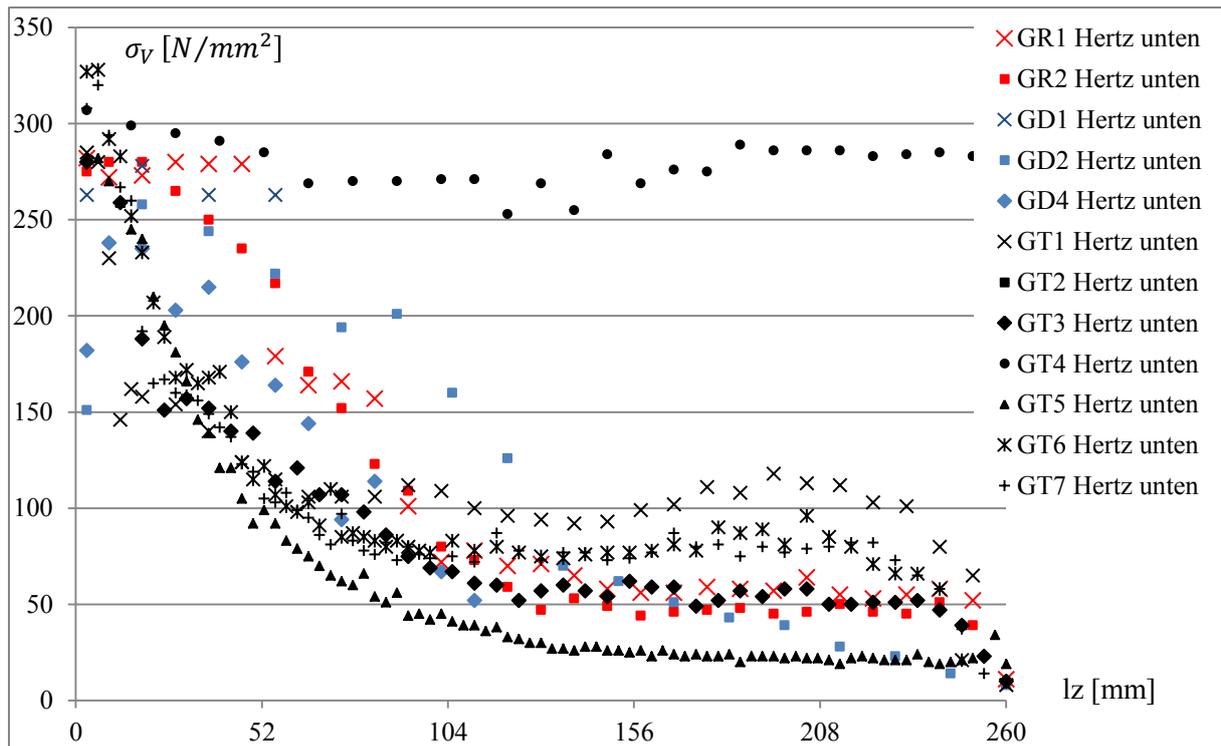


Abb. A1.3: Spannungsverteilung an den Zähnen in Abhängigkeit der Geometrie bei Lager situation 1 an Messbereich 3

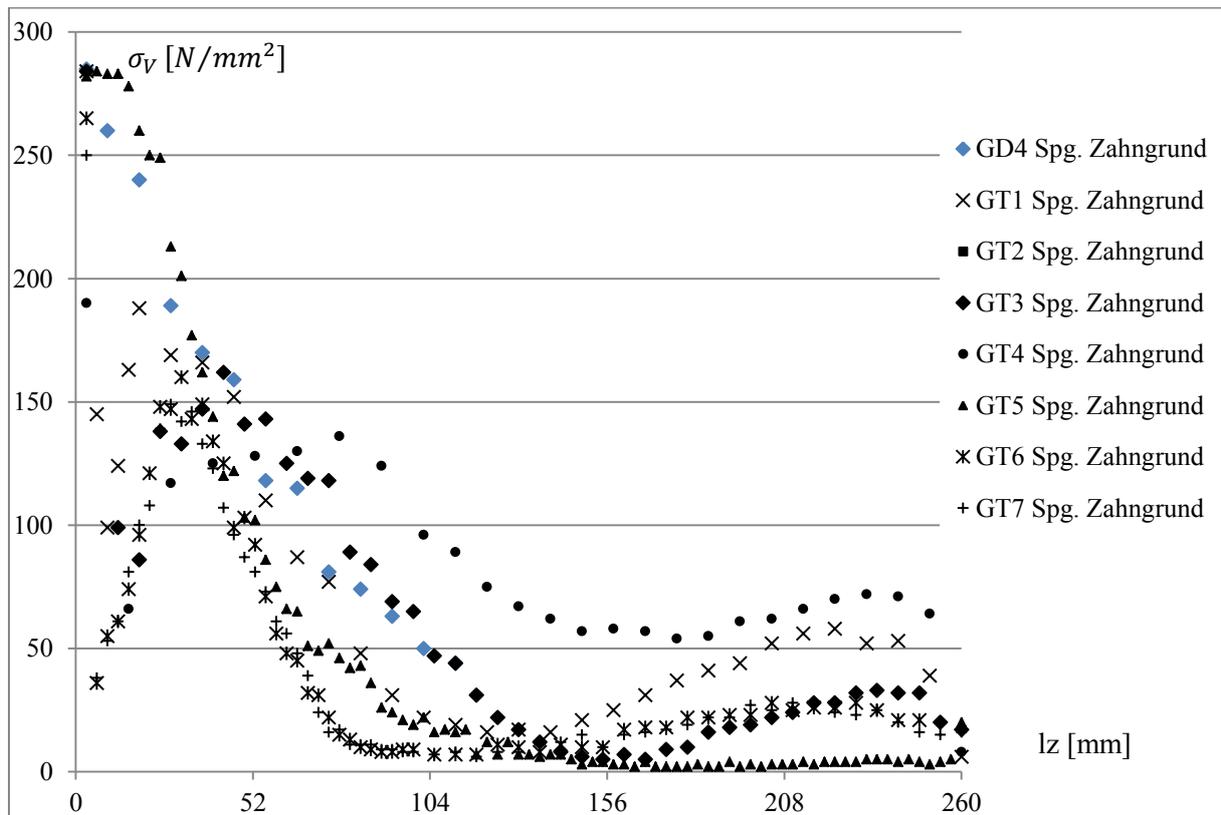


Abb. A1.4: Spannungsverteilung an den Zähnen in Abhängigkeit der Geometrie bei Lager situation 1 an Messbereich 4

Spannungsverteilung in Abhängigkeit der Geometrie bei Lagersituation 2

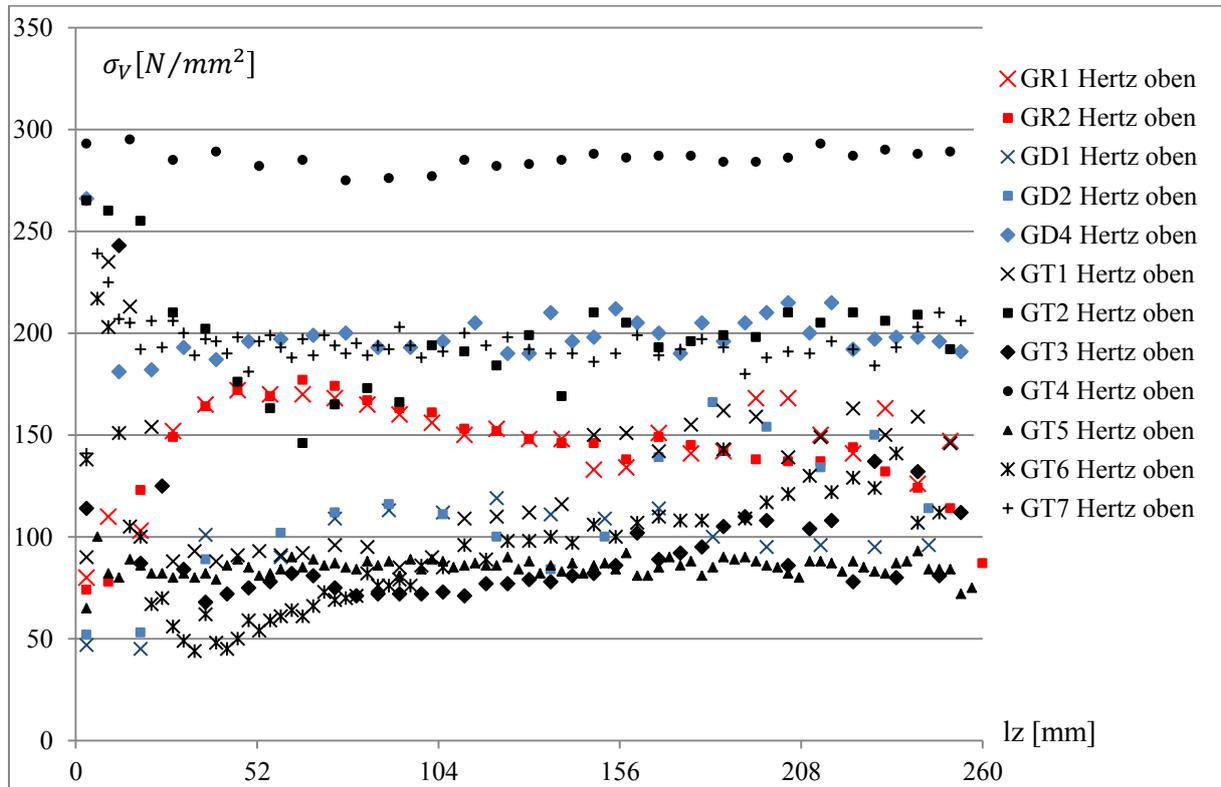


Abb. A1.5: Vergleichsspannung an Messbereich 1 in Abhängigkeit der Geometrie bei Lagersituation 2

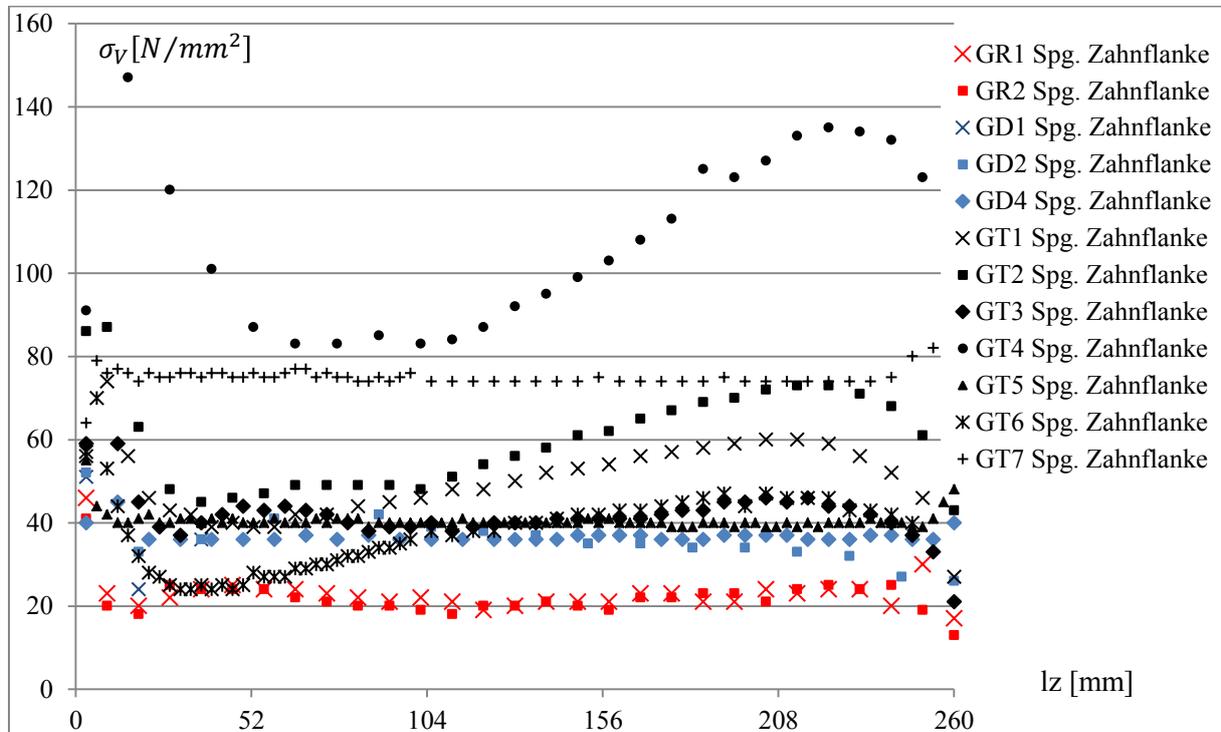


Abb. A1.6: Vergleichsspannung an Messbereich 2 in Abhängigkeit der Geometrie bei Lagersituation 2

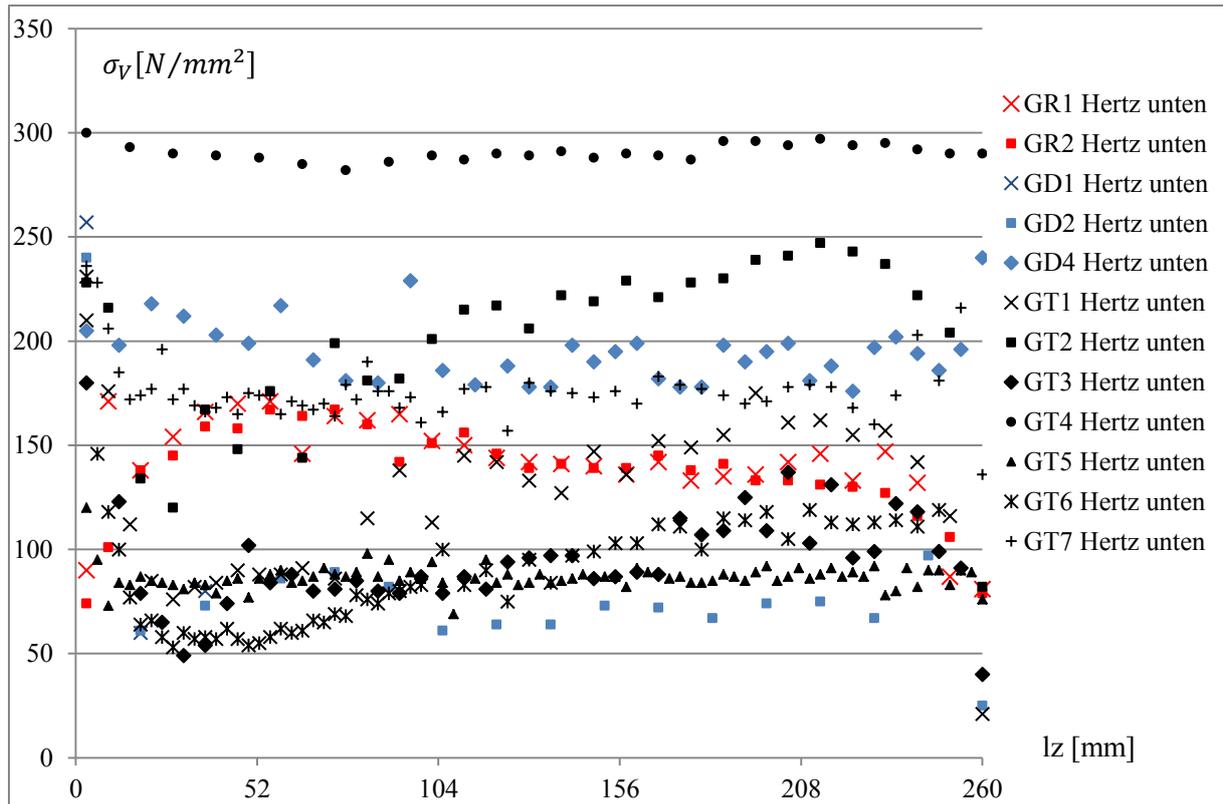


Abb. A1.7: Vergleichsspannung an Messbereich3 in Abhängigkeit der Geometrie bei Lagersituation 2

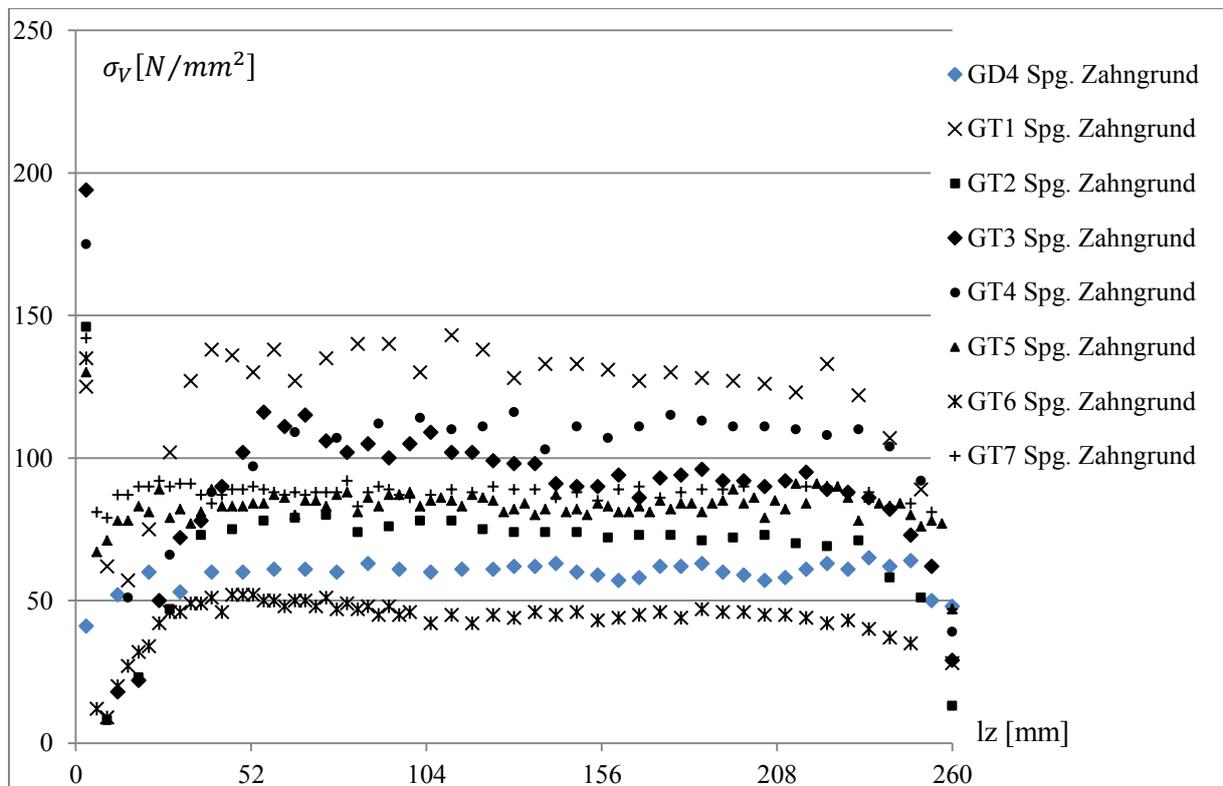


Abb. A1.8: Vergleichsspannung an Messbereich 4 in Abhängigkeit der Geometrie bei Lagersituation 2

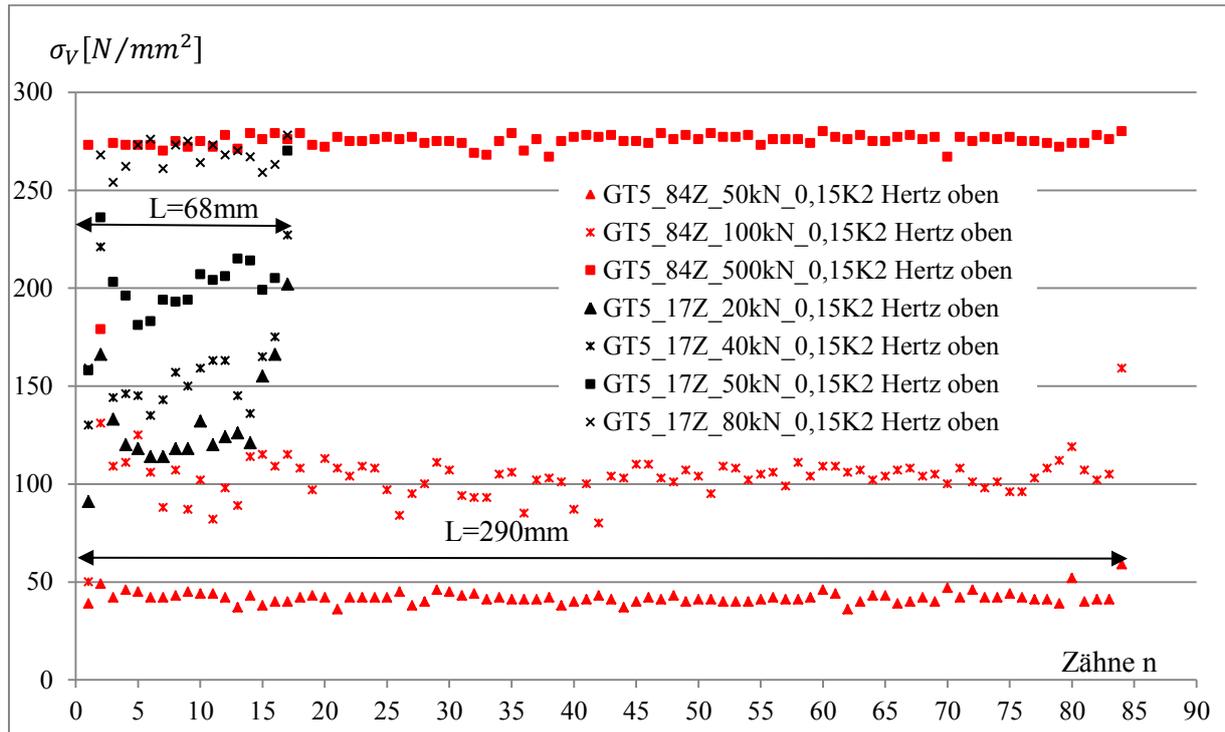


Abb. A1.9: Einfluss der Lastgröße – Messbereich 1

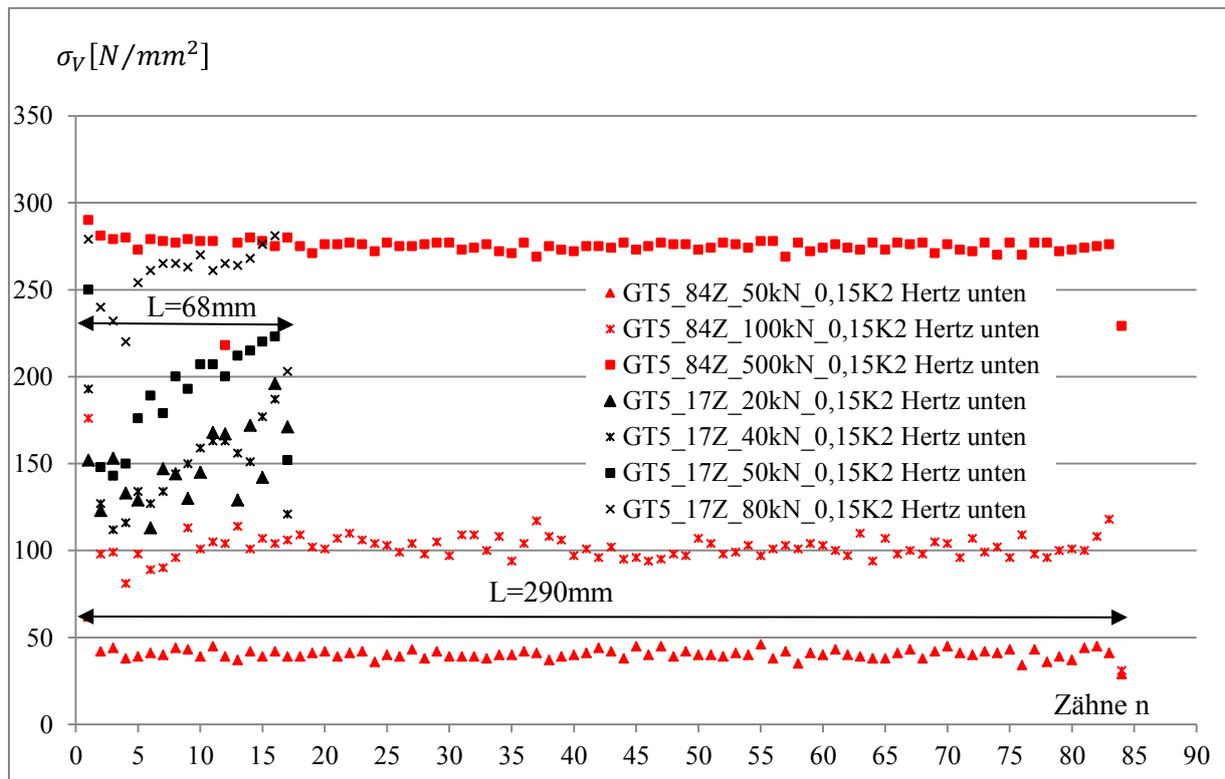


Abb. A1.10: Einfluss der Lastgröße – Messbereich 2

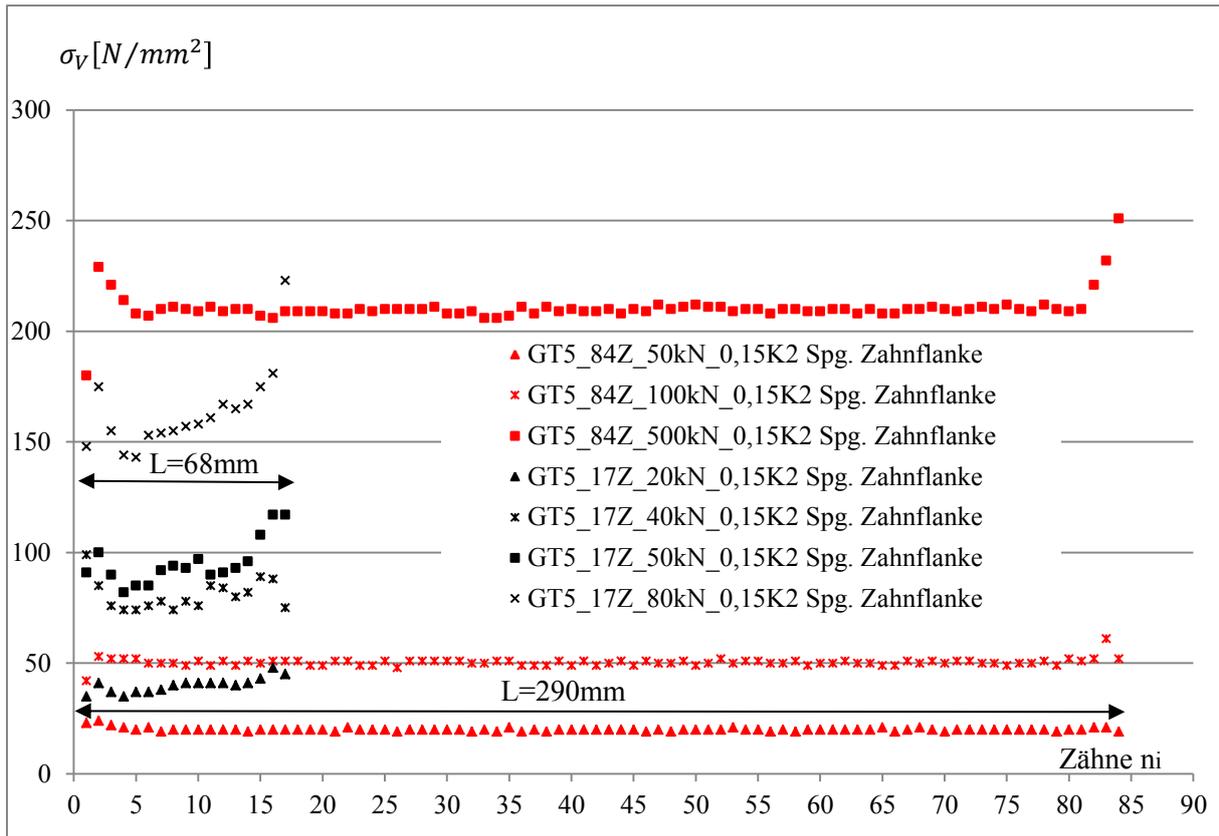


Abb. A1.11: Einfluss der Lastgröße – Messbereich 3

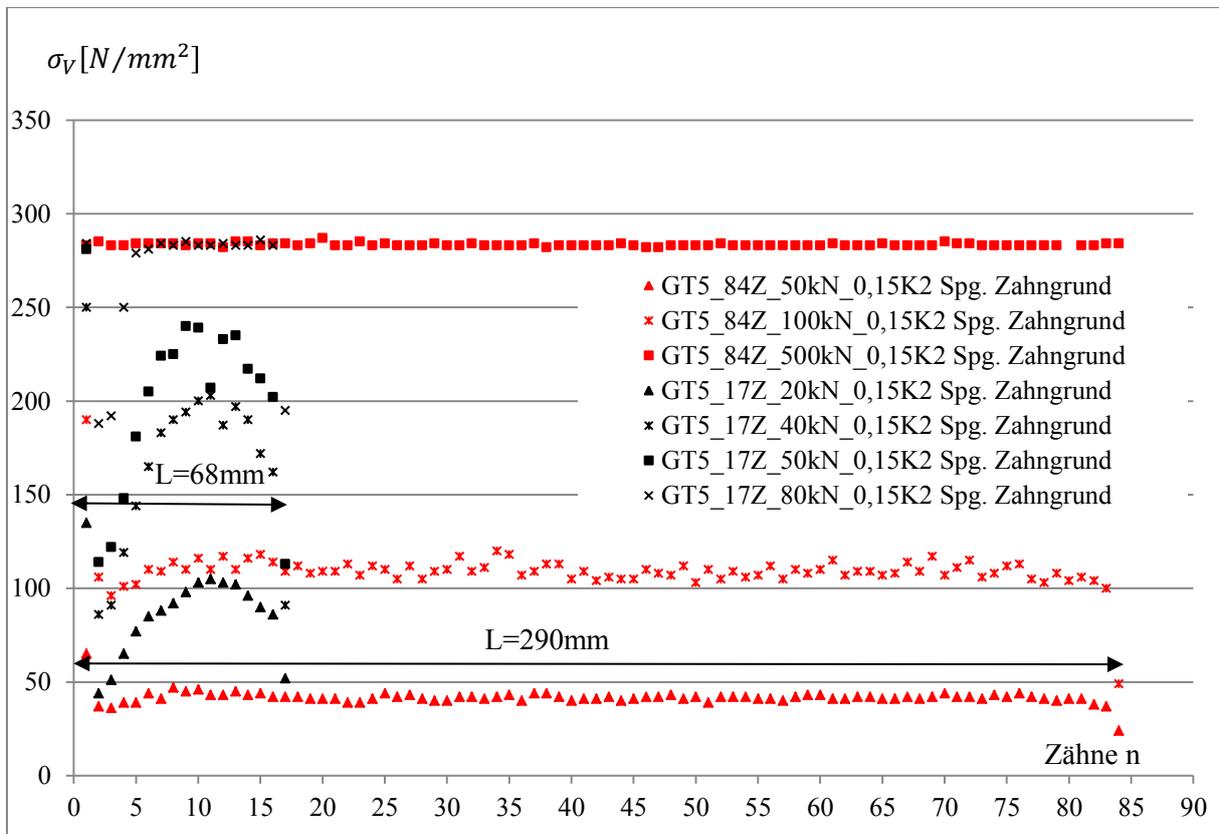


Abb. A1.12: Einfluss der Lastgröße – Messstellen 4

Anhang B: Materialkennwerte

Anhang B1: Materialkennwerte Stahl

Ermittlung der Materialkennwerte des Stahls

Es werden die Materialkennwerte der Stahlprüfkörper ermittelt. Dabei werden aus dem Stahlblech, aus dem auch die Stahlprismen gefertigt werden, 18 Zugproben 8x40 der Form B sowie zwei Flachproben 108 x 60 der Form G gem. DIN 50125 hergestellt. Die Zugprüfungen werden nach der Prüfnorm DIN EN ISO 6892-1 durchgeführt.

Prüfparameter/Versuchsdurchführung

- Vorspannung: 10 MPa
- Prüfgeschwindigkeit E-Modul: 10 MPa/s
- Prüfgeschwindigkeit ab Streckgrenze: 20 MPa/s
- Prüfgeschwindigkeit: 0,004 1/s

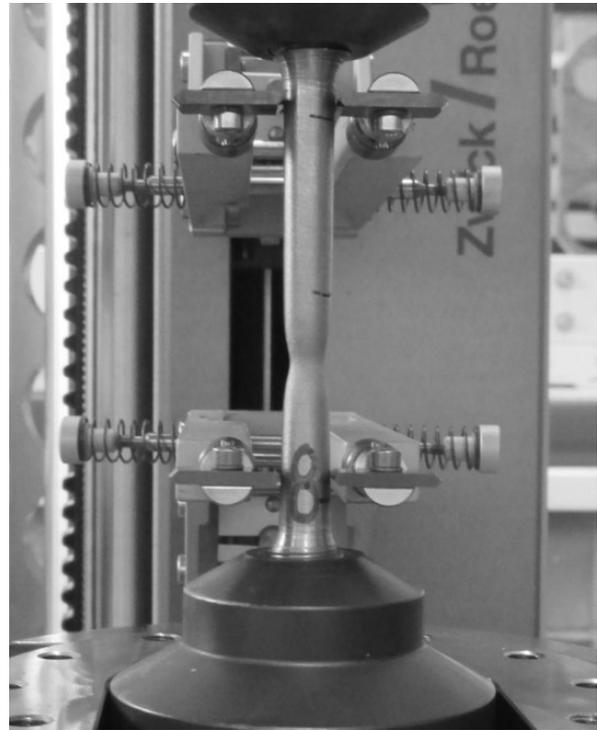


Abb. B1.1 Zugprüfung gem. DIN EN ISO 6892-1

Ergebnisse der Zugversuche zur Ermittlung der Materialkennwerte des Stahls

Ergebnisse: Rundproben Charge 1							
Legende	Bezeichnung	m_E [GPa]	R_{eH} [MPa]	R_{eH^*} [MPa]	R_m [MPa]	A [%]	Z [%]
	R1	303	-	276	454	24,6	74,3
	R2	204	-	264	449	34,3	74,5
	R3	196	-	277	452	31,5	74,1
	R4	199	-	265	449	28,5	73,9
	R5	203	-	262	449	30,6	73,7
	R6	195	-	265	452	32,8	74,4
	R7	202	-	266	450	38,9	74,8
	R8	207	-	266	452	37,1	73,9
	R9	198	-	274	452	37,0	74,5
Statistik: n = 9							
	\bar{x}	212	-	268	451	32,8	74,2
	s	34	-	5,679	2	4,6	0,3
	ν	16,17	-	2,12	0,41	13,95	0,46

Ergebnisse: Rundproben							
Legende	Bezeichnung g	m_E [GPa]	R_{eH} [MPa]	R_{eH^*} [MPa]	R_m [MPa]	A [%]	Z [%]
	R1	303	-	276	454	24,6	74,3
	R2	204	-	264	449	34,3	74,5
	R3	196	-	277	452	31,5	74,1
	R4	199	-	265	449	28,5	73,9
	R5	203	-	262	449	30,6	73,7
	R6	195	-	265	452	32,8	74,4
	R7	202	-	266	450	38,9	74,8
	R8	207	-	266	452	37,1	73,9
	R9	198	-	274	452	37,0	74,5

Ergebnisse: Flachproben Charge 1							
Legende	Bezeichnung	m_E [GPa]	R_{eH} [MPa]	R_{eH^*} [MPa]	R_m [MPa]	A_{60} [%]	Z [%]
	F1	191	302	-	439	35,6	73,1
	F2	203	315	-	442	37,6	72,6
Statistik: n = 2							
	\bar{x}	197	308		440	36,6	72,8
	s	9	9		2	1,5	0,4
	ν	4,34	3,01		0,44	3,97	0,52

Ergebnisse: Flachproben Charge 2							
Legende	Bezeichnung	m_E [GPa]	R_{eH} [MPa]	R_{eH^*} [MPa]	R_m [MPa]	A_{60} [%]	Z [%]
	F3	176	241	-	388	39,8	68,8
	F4	181	244	-	388	34,7	67,6
	F5	190	240	-	387	41,2	64,8
	F6	199	239	-	386	34,5	69,1
Statistik: n = 4							
	\bar{x}	186	241	-	387	37,5	67,6
	s	10	2	-	1	3,5	1,9
	ν	5,40	0,92	-	0,26	9,22	2,87

d_0 = Werkstoffdurchmesser des Prüfkörpers

m_E = E-Modul

R_{eH} = obere Streckgrenze (Wert durch Prüfsoftware bestimmt)

R_{eH^*} = obere Streckgrenze (Wert durch anwählen auf der Arbeitslinie manuell bestimmt)

R_m = Zugfestigkeit

$A_{40/60}$ = Bruchdehnung in % (bezogen auf die 40mm Meßlänge der Extensometerabstände bei den Rundproben und 60mm Meßlänge bei den Flachproben)

Z = Brucheinschnürung

Materialkennwerte für die Simulation in Ansys

Kennwerte für Charge 1			
E-Modul	E =197 GPa		
Streckgrenze	R _{eH} =308 MPa (R _{eH} * = manuell gemessene Werte)		
Zugfestigkeit	R _m =440 MPa		
Bruchdehnung	A ₄₀ =36,6 % (0,366 mm/mm)		
Gleichmaßdehnung	A _g =15,6 % (0,156 mm/mm)		
Tangentenmodul „Bruch“	E _{T,Bruch} = 152 N/mm ²		
Tangentenmodul „Zugfestigk.“	E _{T,Zugfestigk.} = 774 N/mm ²		
Normierung			
E-Modul E _{vorh} /E _{Norm} = 197/210 = 0,94			
Streckgrenze R _{eH,vorh} / R _{eH,Norm} = 308/235 = 1,31			
Zugfestigkeit R _{m,vorh} /R _{m,Norm} = 440/(360 bis 510 N/mm ²) = 1,22 bis 0,86			
Bruchdehnung A _{40,vorh} / A _{40,Norm} = 36,6/26 = 1,41			
Plastischer Bereich der Stahlkennlinie Charge 1 für FE-Simulation			
Ingenieur-Kennlinie		Wahre Kennlinie	
Dehnung [mm/mm]	Spannung [N/mm ²]	Dehnung [mm/mm]	Spannung [N/mm ²]
0,000	285,0	0,000	285,0
0,010	286,0	0,010	289,0
0,020	295,0	0,015	299,0
0,020	308,0	0,020	314,0
0,030	328,0	0,030	337,0
0,040	359,0	0,040	373,0
0,050	381,0	0,050	400,0
0,060	397,0	0,060	422,0
0,070	410,0	0,070	440,0
0,090	419,0	0,080	455,0
0,100	426,0	0,090	468,0
0,110	431,0	0,110	479,0
0,130	434,0	0,120	489,0
0,140	435,0	0,130	496,0
0,150	435,0	0,140	502,0
0,170	435,0	0,160	509,0
0,190	435,0	0,170	516,0
0,200	435,0	0,180	520,0
0,280	435,0	0,250	557,0

The graph plots stress σ [N/mm²] on the y-axis (0 to 600) against strain ϵ [mm/mm] on the x-axis (0 to 0,3). Two curves are shown: a solid line for the 'Ingenieur-Kennlinie' and a dashed line for the 'Wahre Kennlinie'. Both curves start at approximately 285 N/mm² at zero strain. The engineering curve reaches a maximum stress of 435 N/mm² at a strain of 0,200. The true curve continues to rise, reaching a maximum stress of 557 N/mm² at a strain of 0,250, and then begins to decrease.

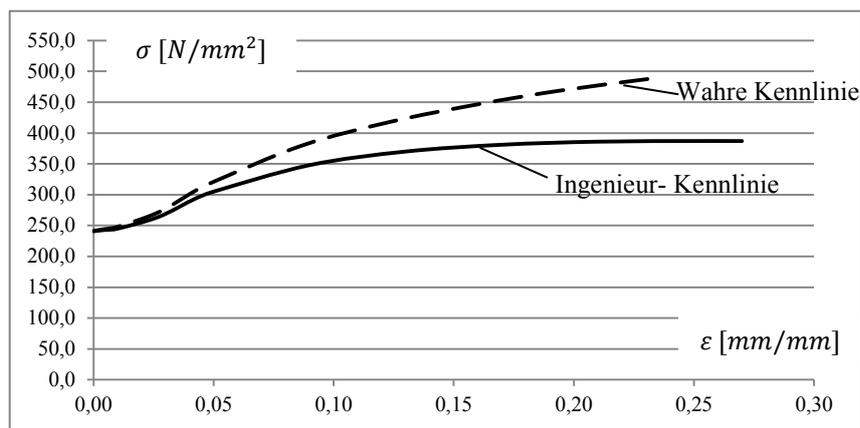
Kennwerte für Charge 2	
E-Modul	$E = 186 \text{ GPa}$
Streckgrenze	$R_{eH} = 241 \text{ MPa}$ ($R_{eH}^* = \text{manuell gemessene Werte}$)
Zugfestigkeit	$R_m = 387 \text{ MPa}$
Bruchdehnung	$A_{40} = 37,5 \%$ (0,375 mm/mm)
Gleichmaßdehnung	$A_g = 12,9 \%$ (0,129 mm/mm)
Tangentenmodul „Bruch“	$E_{T,Bruch} = 217 \text{ N/mm}^2$
Tangentenmodul „Zugfestigk.“	$E_{T,Zugfestigk.} = 575 \text{ N/mm}^2$

Normierung

E-Modul $E_{\text{vorh}}/E_{\text{Norm}} = 186/210 = 0,94$
Streckgrenze $R_{eH,\text{vorh}}/R_{eH,\text{Norm}} = 241/235 = 1,03$
Zugfestigkeit $R_{m,\text{vorh}}/R_{m,\text{Norm}} = 387/(360 \text{ bis } 510 \text{ N/mm}^2) = 1,08 \text{ bis } 0,76$
Bruchdehnung $A_{40,\text{vorh}}/A_{40,\text{Norm}} = 37,5/26 = 1,44$

Plastischer Bereich der Stahlkennlinie Charge 2 für FE-Simulation

Ingenieur-Kennlinie		Wahre Kennlinie	
Dehnung [mm/mm]	Spannung [N/mm ²]	Dehnung [mm/mm]	Spannung [N/mm ²]
0,0000	241,0	0,0000	241,0
0,0025	242,0	0,0025	243,0
0,0050	243,0	0,0050	244,5
0,0100	245,0	0,0100	248,0
0,0270	264,0	0,0270	271,5
0,0420	293,0	0,0420	305,6
0,0500	305,0	0,0500	321,0
0,0900	348,0	0,0870	380,0
0,1300	370,0	0,1240	418,5
0,1700	381,0	0,1600	446,5
0,2100	386,0	0,1940	468,6
0,2500	387,0	0,2300	487,1
0,2650	387,0	0,2360	490,4



Weitere normierte Werkstoffkennwerte:

Schubmodul	$G = 81000 \text{ MPa}$
Querdehnzahl	$\nu = 0,30$
Dichte	$\rho = 7850 \text{ kg/m}^3$
Temperaturausdehnungskoeffizient	$\alpha_T = 0,000012 \text{ K}^{-1}$

Anhang B2: Materialkennwerte Beton

Allgemeines

Beton wird als Drei-Phasen-Werkstoff, bestehend aus Gesteinskörnungen, Zement und Wasser bezeichnet. Ultrahochfester Beton hat darüber hinausgehend noch Zusatzmittel und Zusatzstoffe beigemischt. Da ultrahochfester Beton schlagartig spröde versagt, werden häufig Stahlfasern beigemischt um ein duktileres Verhalten zu erreichen. Bei normalfesten Beton verlaufen die Risse entlang der Gesteinskörnung, im ultrahochfesten Beton durch die Gesteinskörnung hindurch (Zilch, Zehetmaier 2010). Die Festigkeit von ultrahochfesten Beton ist somit von der Gesteinskörnung abhängig.

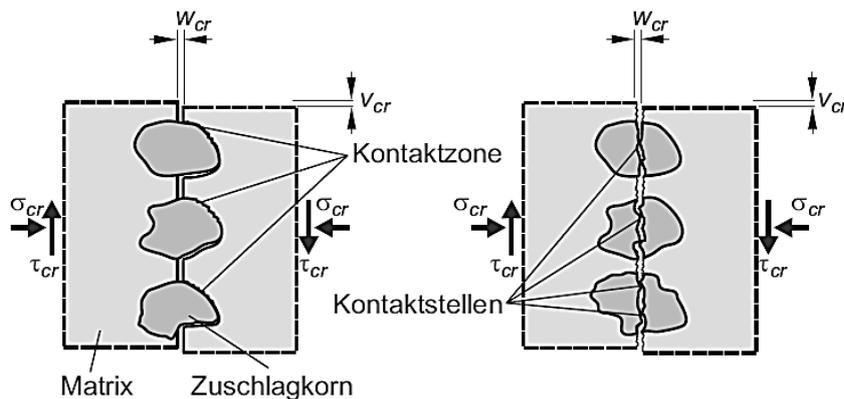


Abb. B2.1 unterschiedliche Rissverläufe bei NFB und UHFB (Zilch, Zehetmaier 2010, S.116)

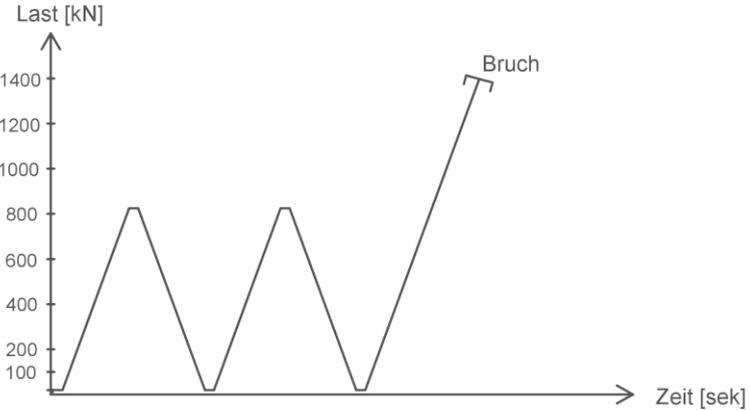
Gemäß dem Größtkorndurchmesser werden ultrahochfeste Betone in zwei Typen unterschieden, feinkörniger Beton mit einem Größtkorn von 0,5 mm und grobkörniger Beton mit einem Größtkorn bis zu 16 mm (Fehling 2005).

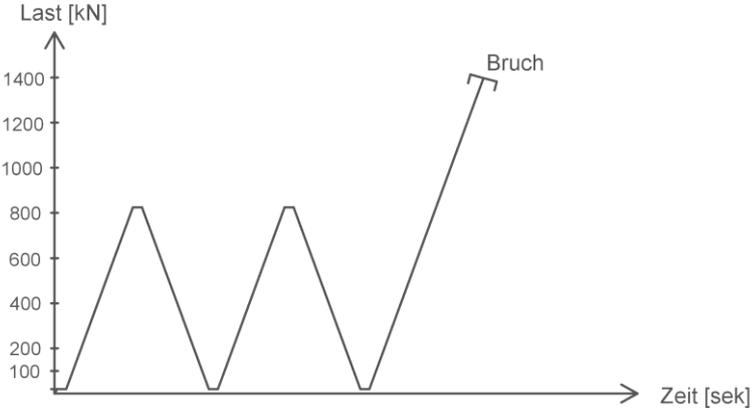
Probekörper

Es werden zylindrische Probekörper gemäß DIN EN 12390-13 mit den Abmessungen $d/h=150/300\text{mm}$ hergestellt. Die Lagerung erfolgt unter Wasser. Vor der Prüfung wird die Oberfläche der Probe geschliffen. Die Prüfung erfolgt an einem 3,0 MN Lastrahmen Bauform 2031 (Toni Technik GmbH) mit einer Belastungsgeschwindigkeit von 0,6 mm/min. Die Wege werden über drei vertikal angebrachte induktive Wegaufnehmer aufgenommen.



Abb. B2.2 Zylinderherstellung

Betonprüfung: Ultralith für die Prüfkörper Phase II, Phase III (V1-V3), Phase IV			
Prüfkörper	Lastpfad		
			
Prüfmaschine	Lastrahmen Bauform 2031 (Toni Technik GmbH) 3,0 MN		
Belastungsgeschwindigkeit	0,6 mm/min = 0,01 mm/sek		
Prüfvorschrift	DIN EN 12390-13:2014		
Wegaufnehmer	3x vertikal		
	ZY 1	ZY 2	ZY 3
Herstelldatum	19.10.2016	19.10.2016	19.10.2016
Prüfdatum	21.11.2016	21.11.2016	21.11.2016
Betonalter	32d	32d	32d
Lagerung	unter Wasser	unter Wasser	unter Wasser
Durchmesser [mm]	149,61	149,61	151,13
Höhe [mm]	296,62	298,06	303,84
Fläche [cm ²]	175,80	176,50	179,39
Bruchlast [kN]	2200,32	2085,83	2165,29
Bruchspannung [N/mm ²]	125,16	118,18	120,70
E-Modul [N/mm ²]	43.240	44.170	45.100
Gemittelter E-Modul [N/mm ²]	44.170		

Betonprüfung: Betec für die Prüfkörper Phase III (V4-V6)				
Prüfkörper		Lastpfad		
				
Prüfmaschine	Lastrahmen Bauform 2031 (Toni Technik GmbH) 3,0 MN			
Belastungsgeschwindigkeit	0,24 mm/min = 0,004 mm/sek			
Prüfvorschrift	DIN EN 12390-13:2014			
Wegaufnehmer	3x vertikal			
ZY=Zylinder	ZY 4	ZY 5	ZY 6	ZY 7
Herstelldatum	11.09.2017			
Prüfdatum	10.10.2017			
Betonalter	29d			
Lagerung	an der Luft			
Durchmesser [mm]	149,87	149,82	149,90	149,97
Höhe [mm]	296,91	298,34	296,64	295,71
Fläche [cm ²]	176,41	176,29	176,48	176,64
Bruchlast [kN]	1413,64	1458,46	1509,79	1574,60
Bruchspannung [N/mm ²]	80,13	82,73	85,55	89,14
E-Modul [N/mm ²]	31.342	27.863	28.026	28.806

Charge ZY4 (Konsole 4)

Charge ZY5 (Konsole 5)

Charge ZY6+7 (Konsole 6)

Kraft-/Verformungskurven

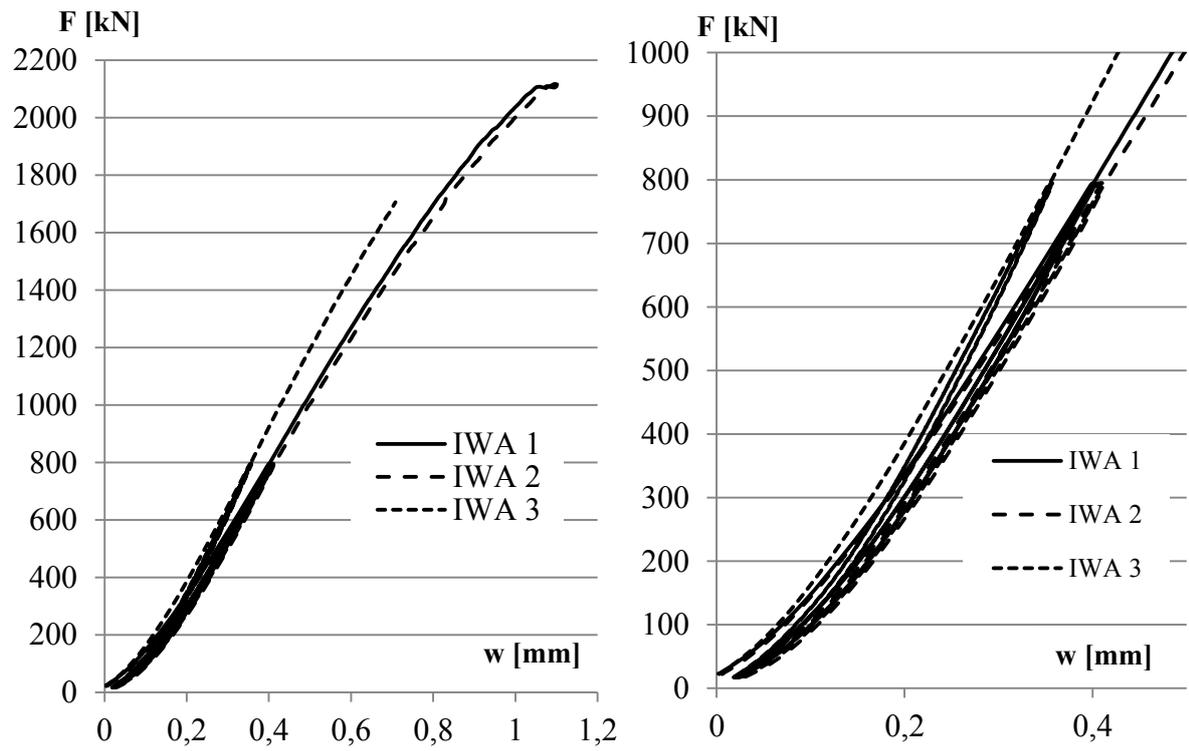


Abb.B.2.3: Kraft/Verformungslinie Zylinder 1

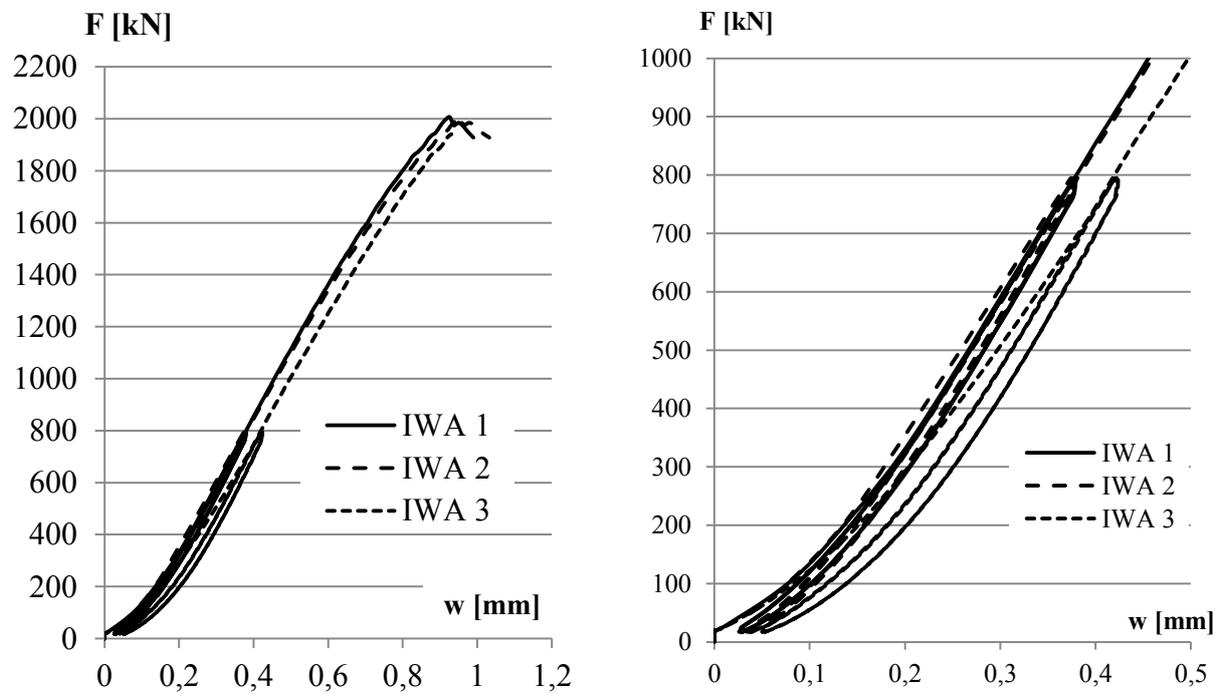


Abb. B.2.4: Kraft/Verformungslinie Zylinder 2

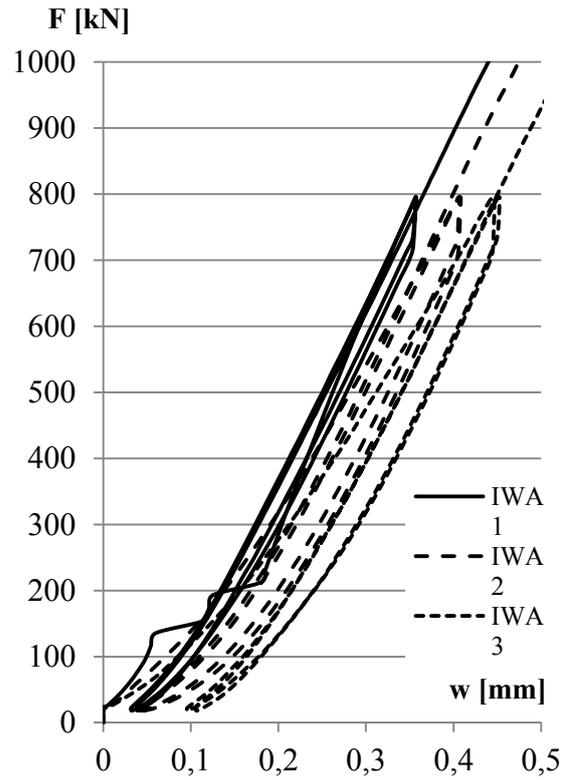
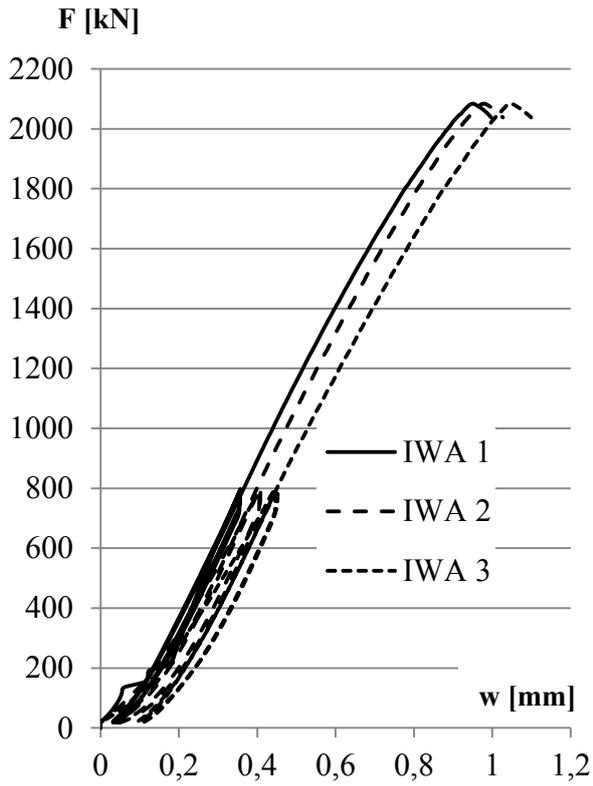


Abb. B.2.5: Kraft/Verformungslinie Zylinder 3

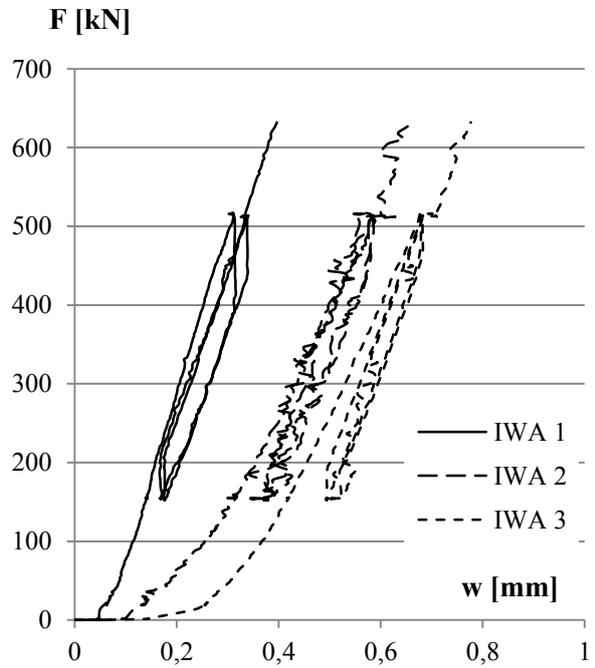
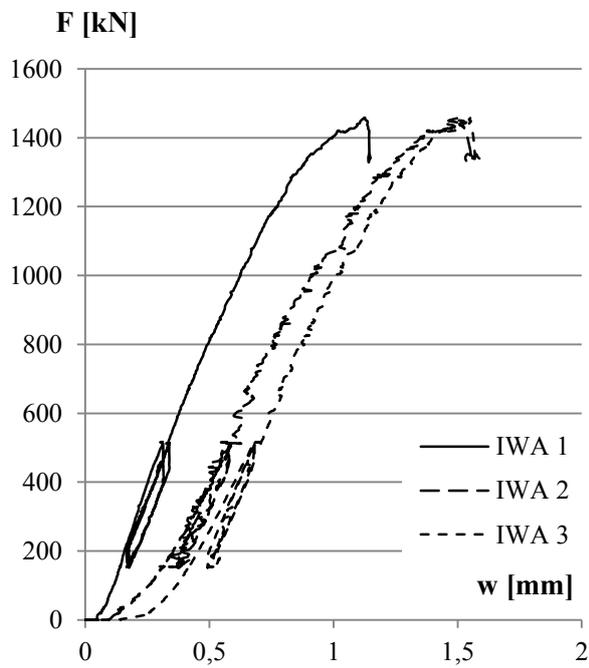


Abb. B.2.6: Kraft/Verformungslinie Zylinder 4

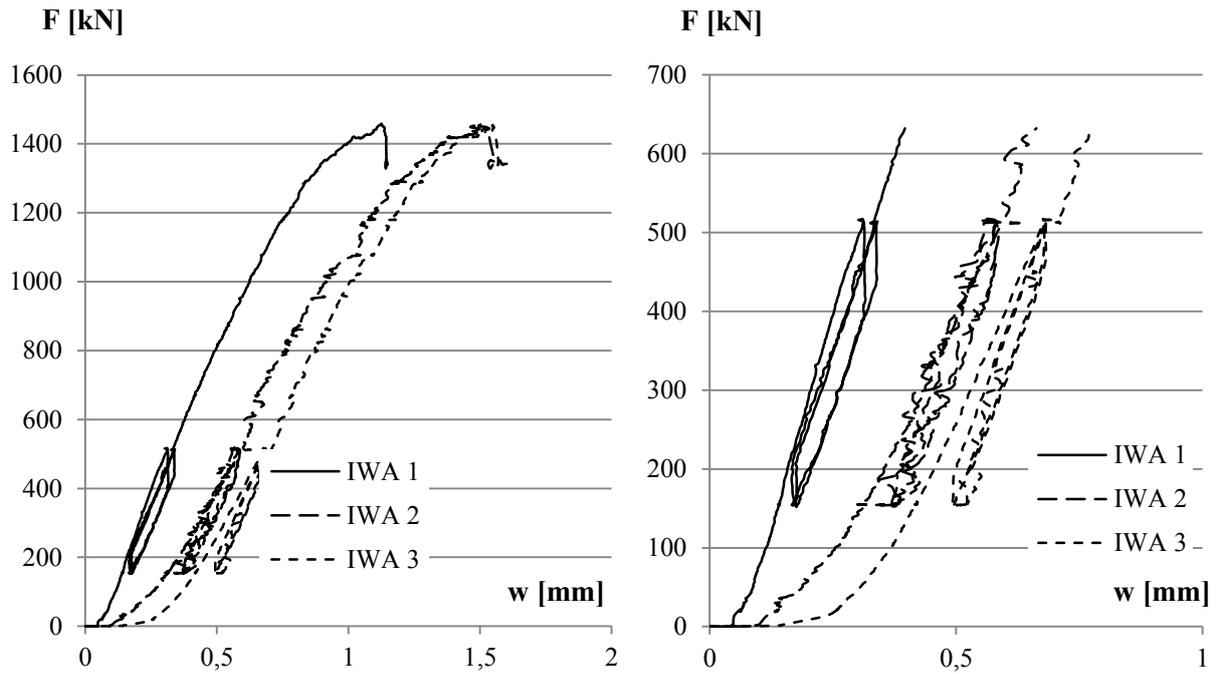


Abb. B.2.7: Kraft/Verformungslinie Zylinder 5

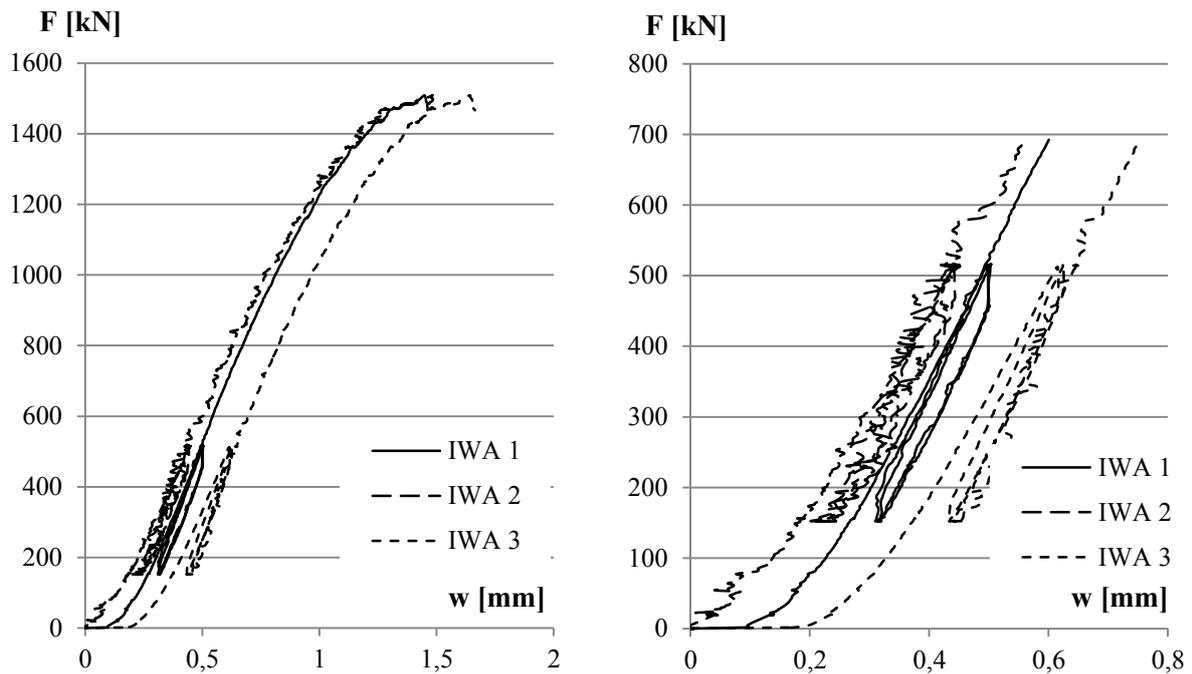


Abb. B.2.8: Kraft/Verformungslinie Zylinder 6

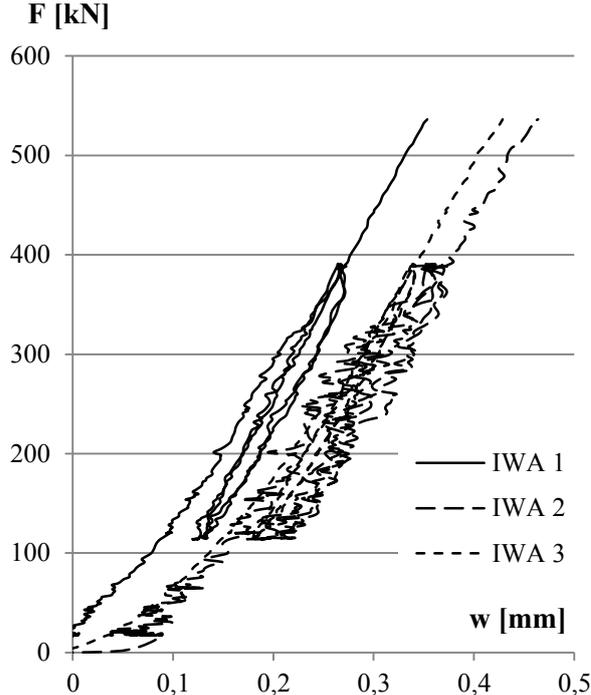
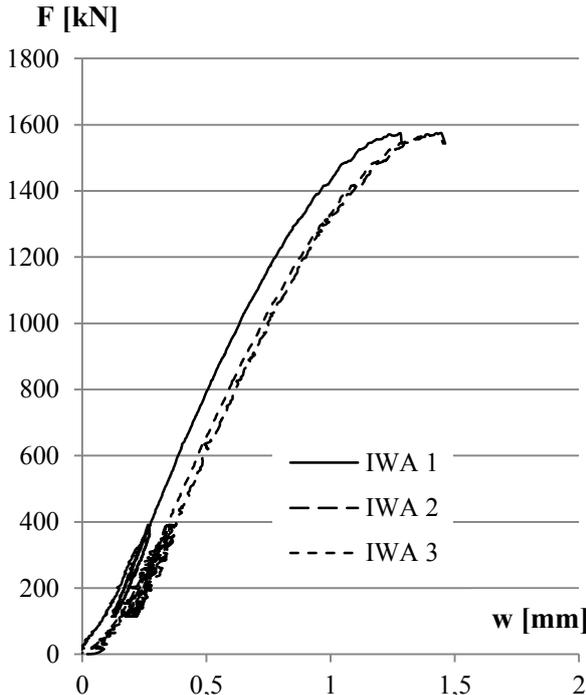


Abb. B.2.9: Kraft/Verformungsline Zylinder 7

Ausgewählte Bruchbilder der Zylinder



Abb. B.2.10: Bruchbilder der Zylinder

Anhang C: Dokumentation Versuche

Anhang C1: Dokumentation Versuche Phase I

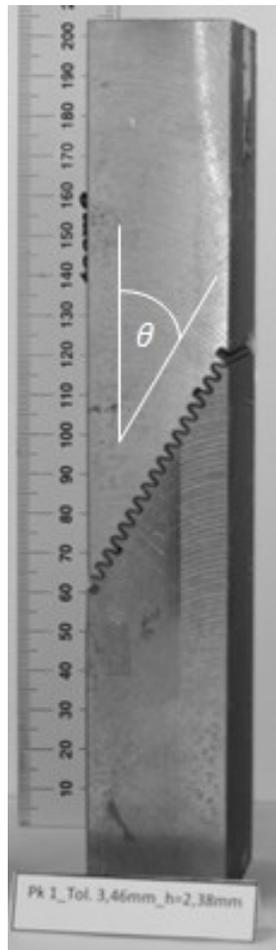
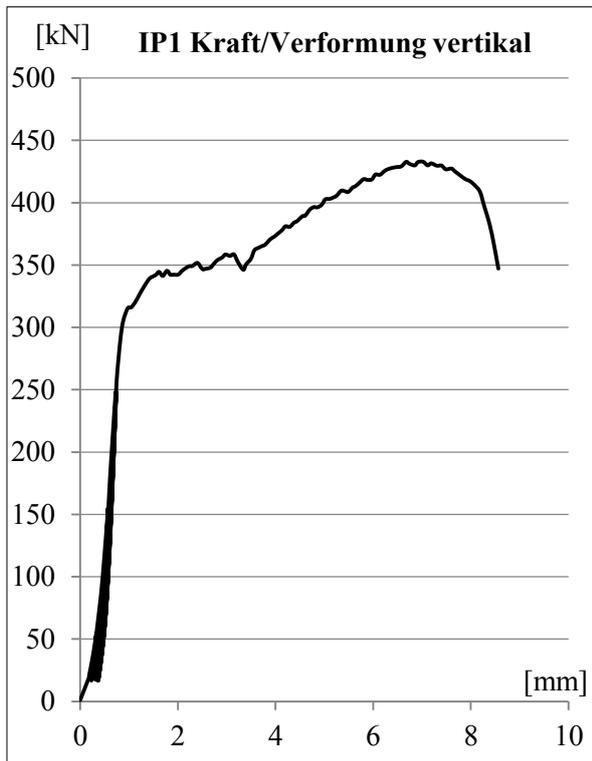


Abb.C1.1: Prüfkörper Phase I

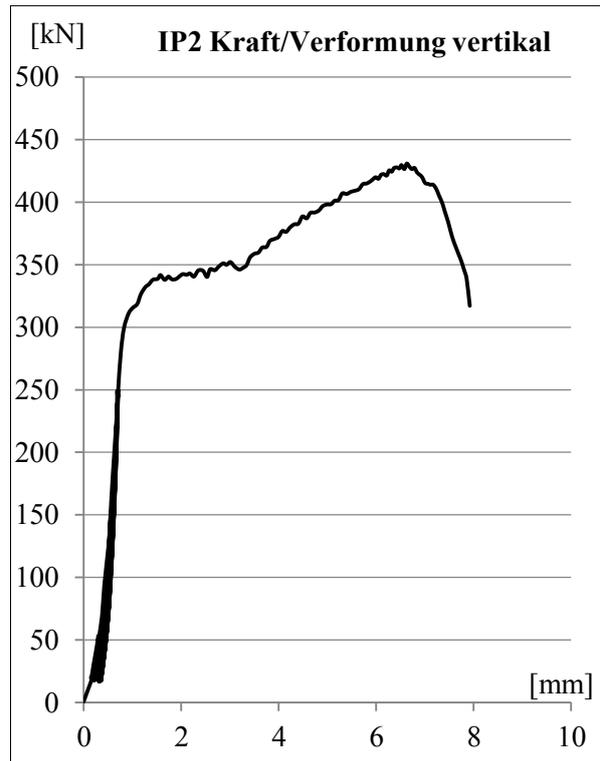
Tab.C1.1: Versuchsprogramm Phase I

Versuch s-nr.	Zahn höhe	Zahn- grund- länge	An- zahl PK	Zahn- anzahl	Fugen- neigung	Abmessungen			Material
						b [mm]	t [mm]	h [mm]	
I/R	-	-	1	-	-	32	40	200	S235 Charge 1
I/P1/2	2,8	3,5	2	17	30°	32	40	200	S235 Charge 1
I/P3/4	3,0	5,0	2	12	30°	32	40	200	S235 Charge 1
I/P5/6	2,8	3,5	2	17	20°	32	40	200	S235 Charge 2
I/P7/8	2,8	3,5	2	17	25°	32	40	200	S235 Charge 2
I/P9/10	2,8	3,5	2	17	45°	43	40	200	S235 Charge 2
I/P11/12	2,8	3,5	2	17	50°	46	40	200	S235 Charge 2
I/P13	2,8	3,5	1	17	70°	56	40	200	S235 Charge 2
I/P14	2,8	3,5	1	17	90°	61	40	200	S235 Charge 2

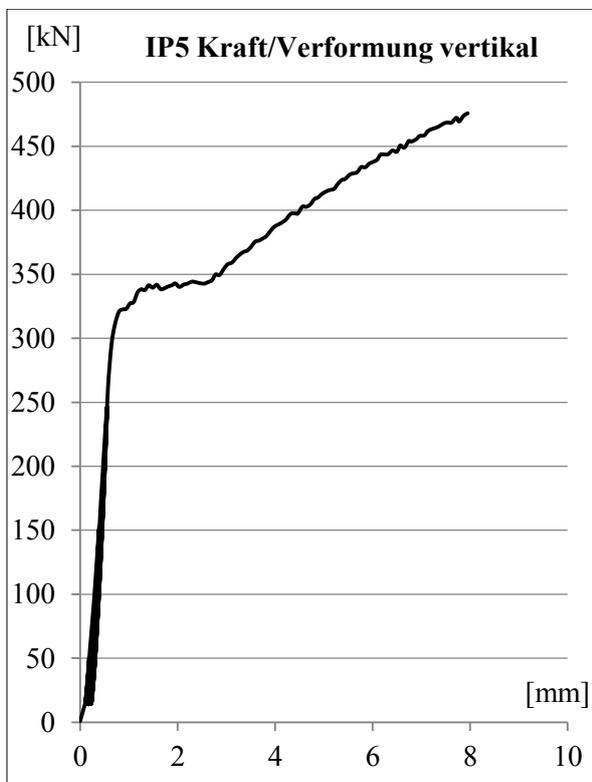
IP1



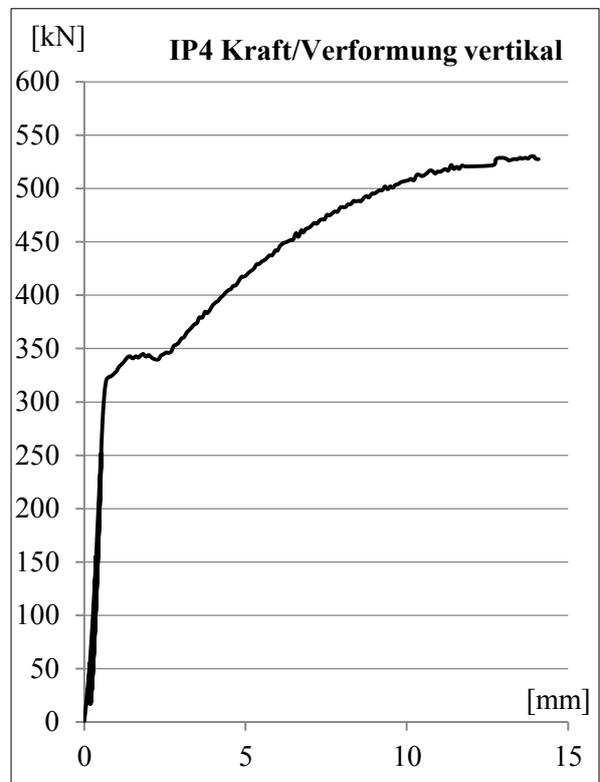
IP2



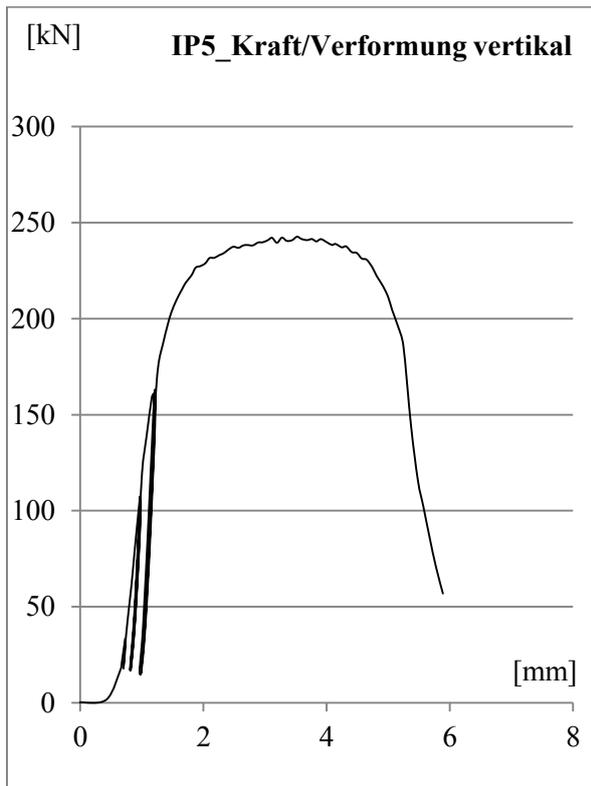
IP3



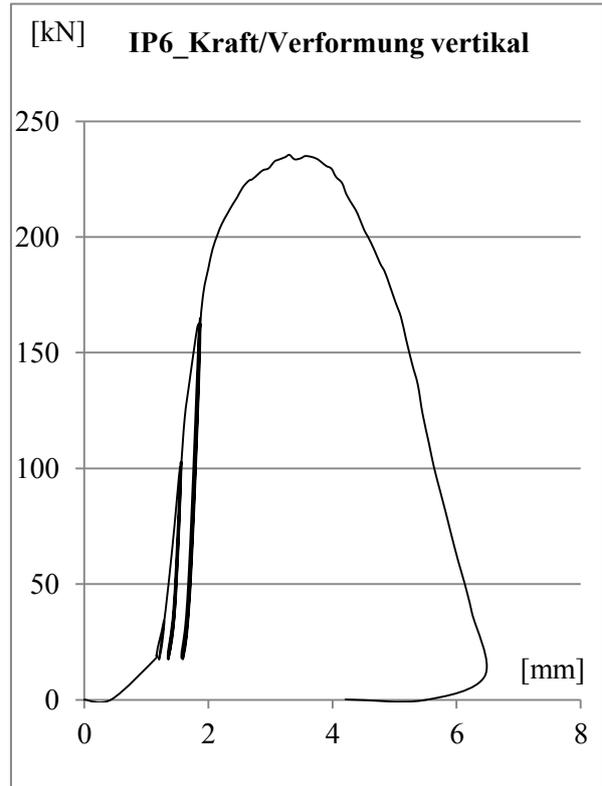
IP4



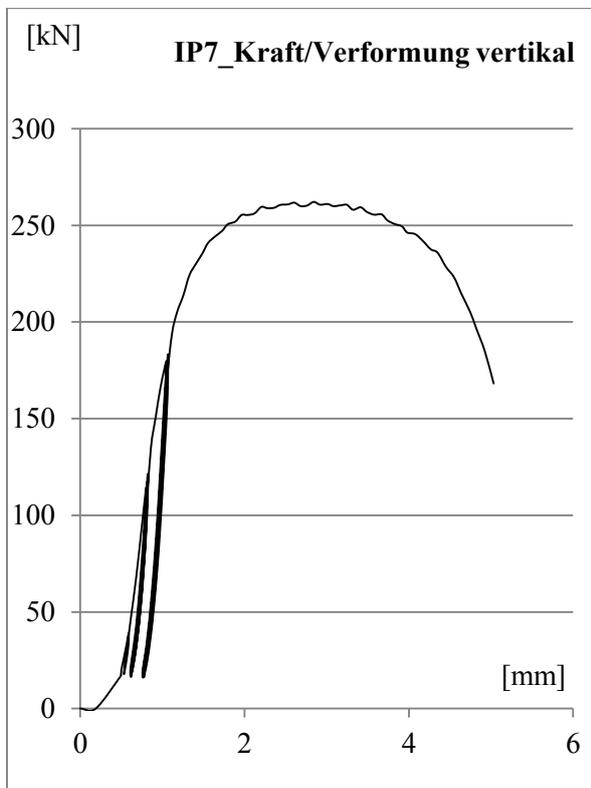
IP5



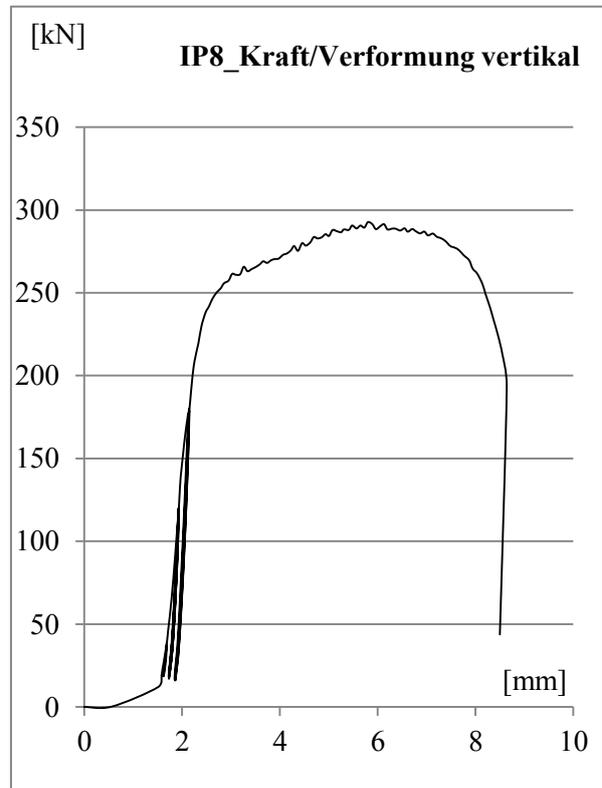
IP6



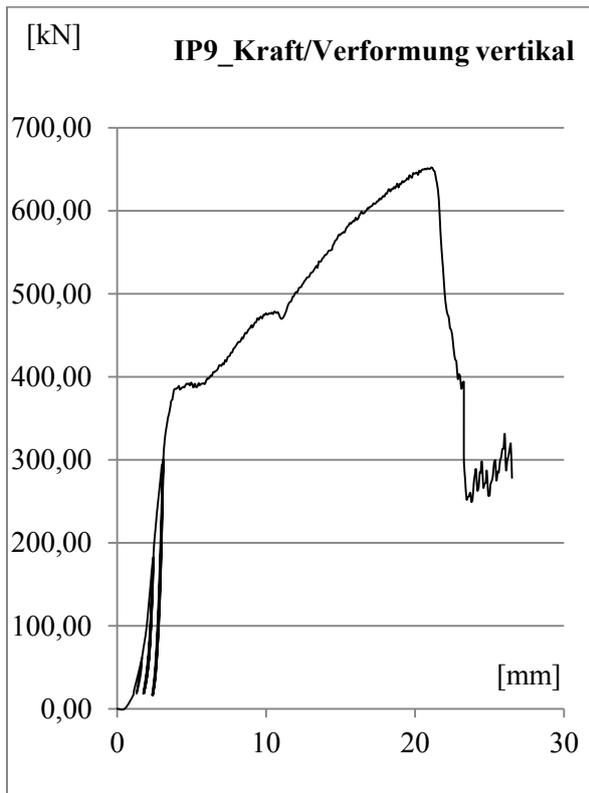
IP7



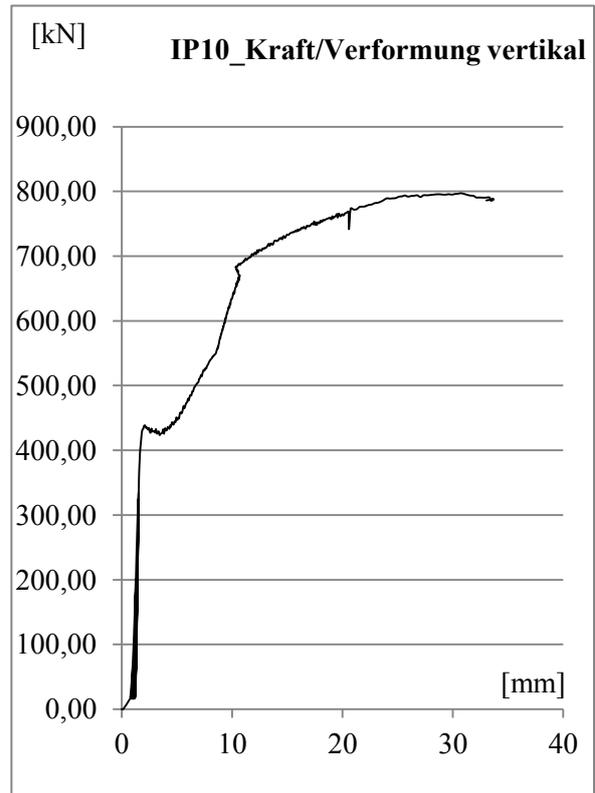
IP8



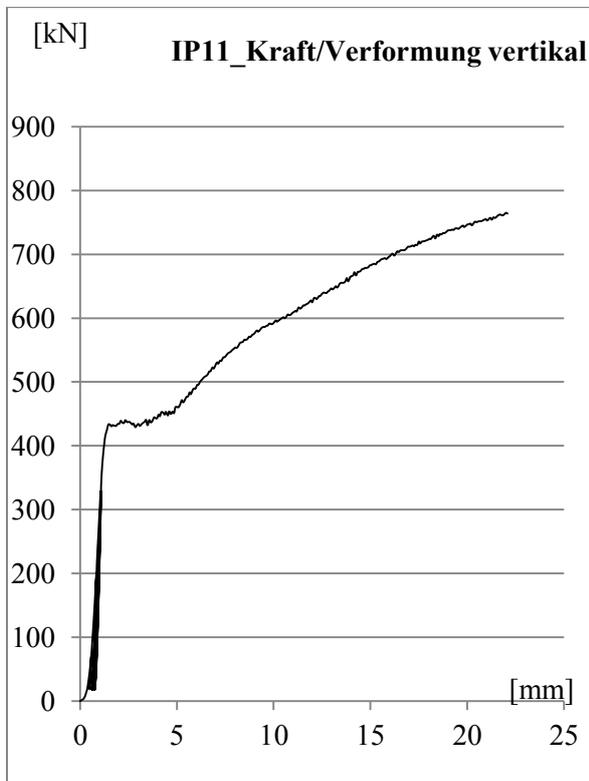
IP9



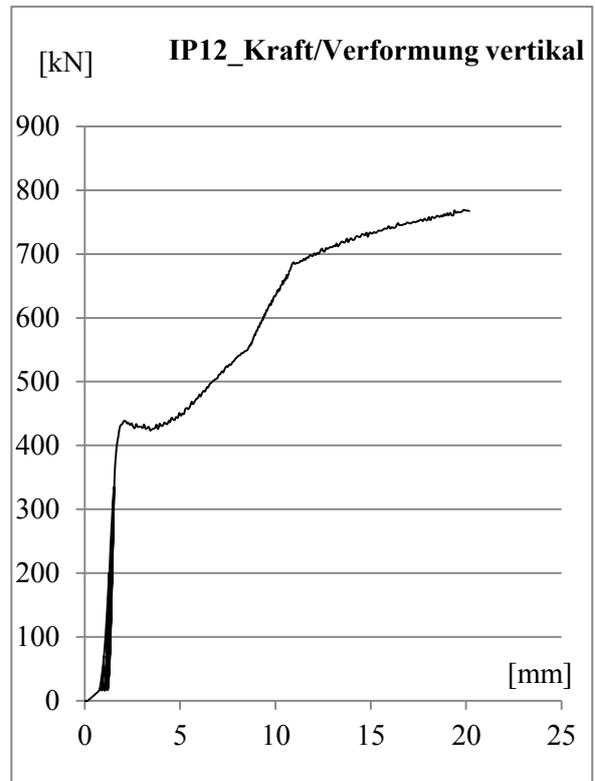
IP10



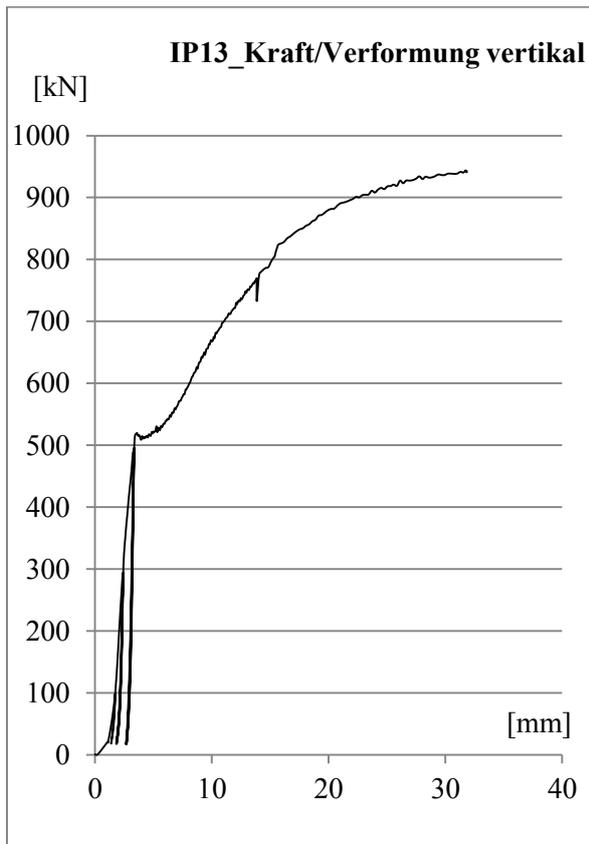
IP11



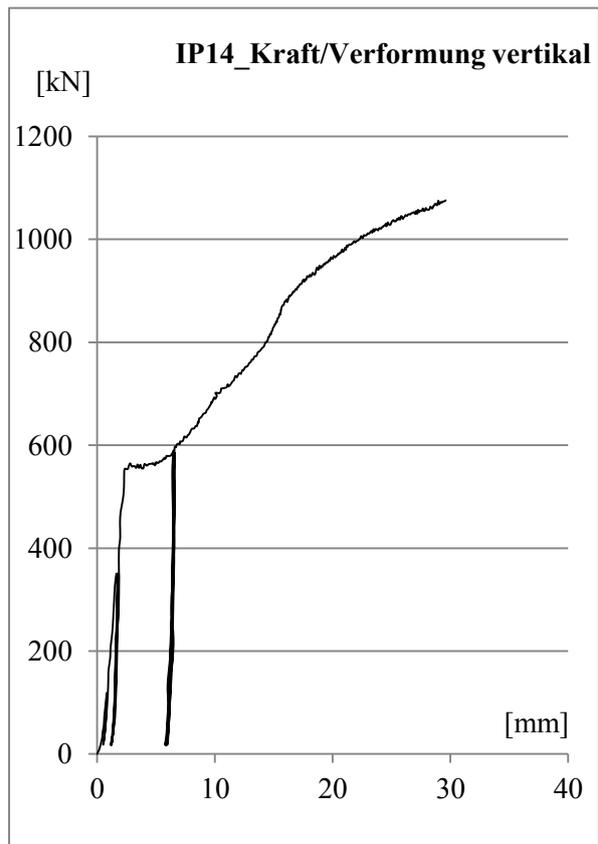
IP12



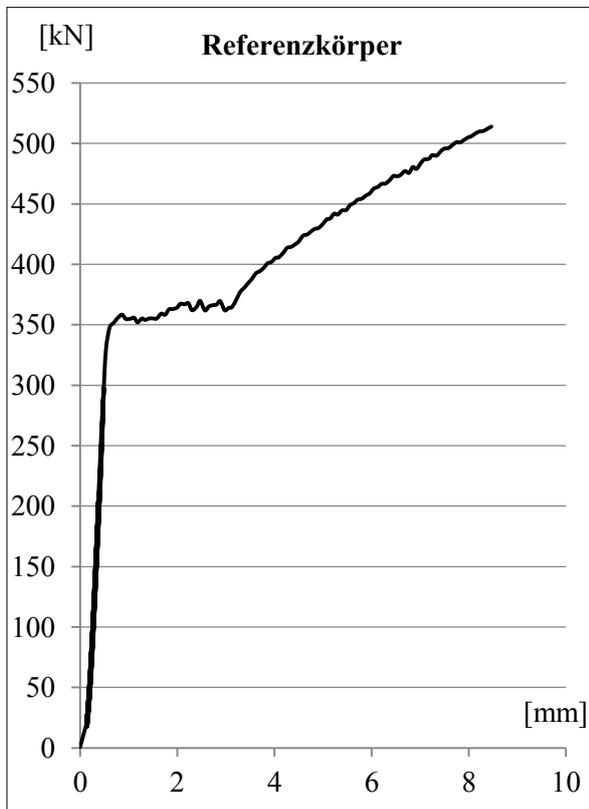
IP13

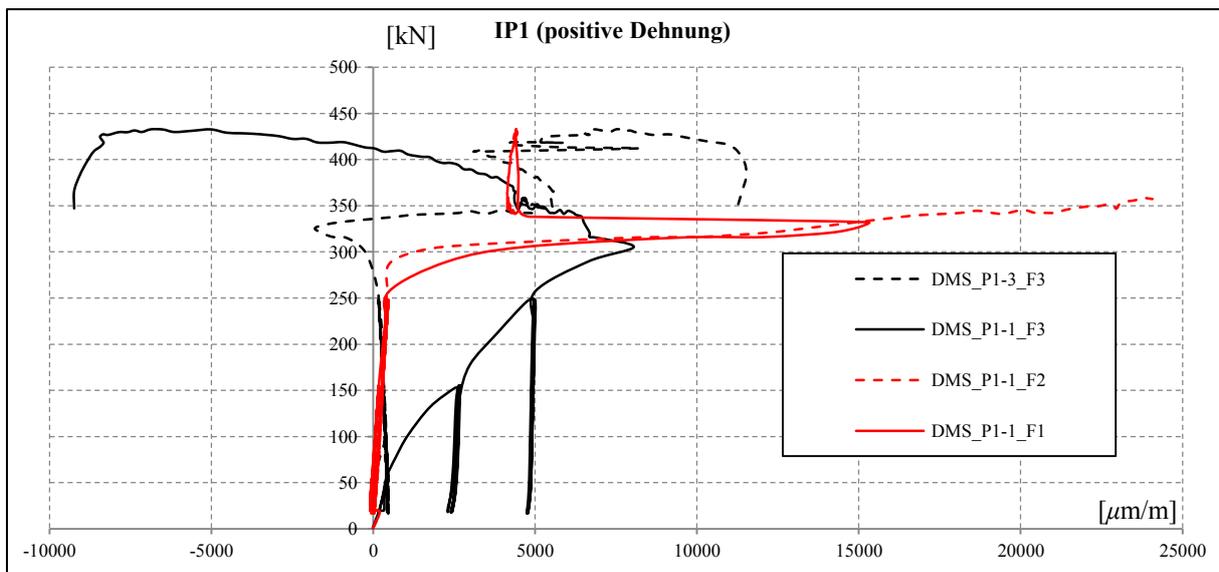
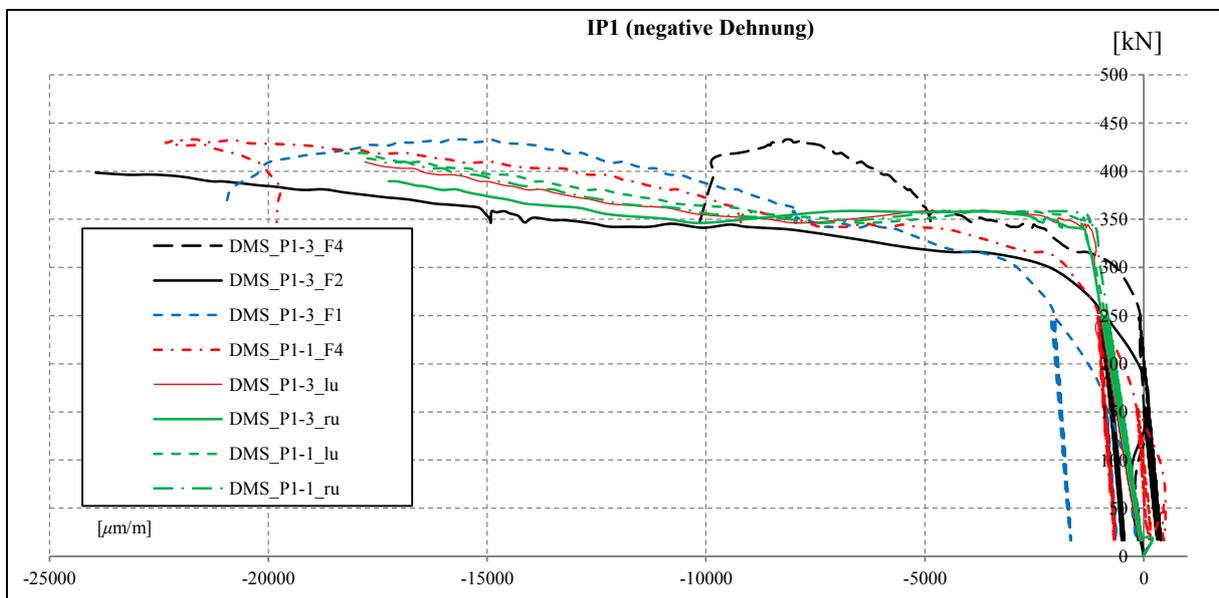
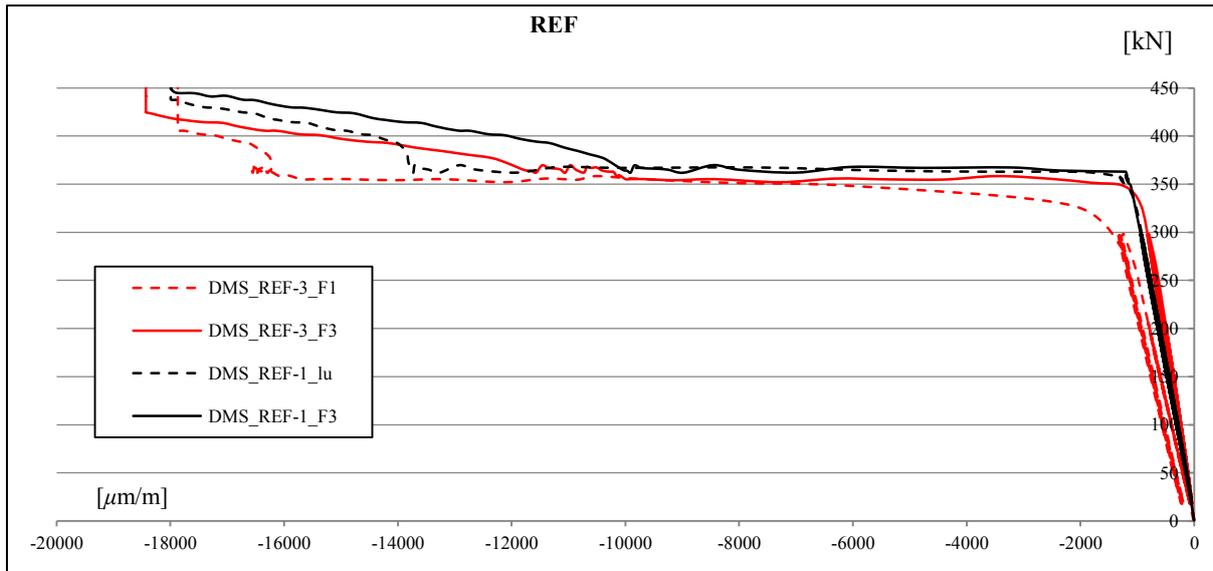


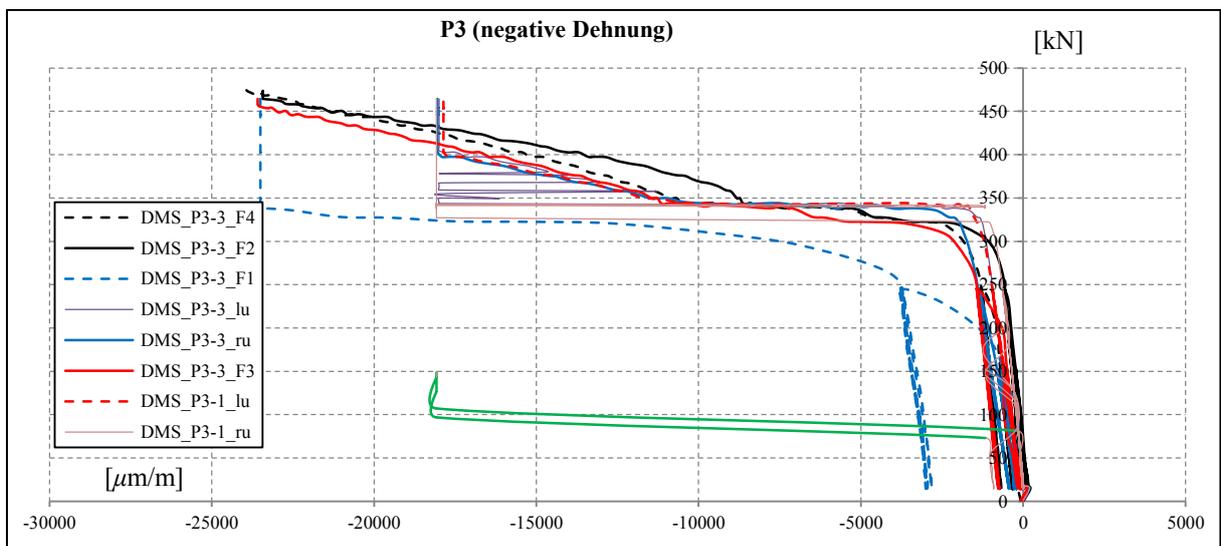
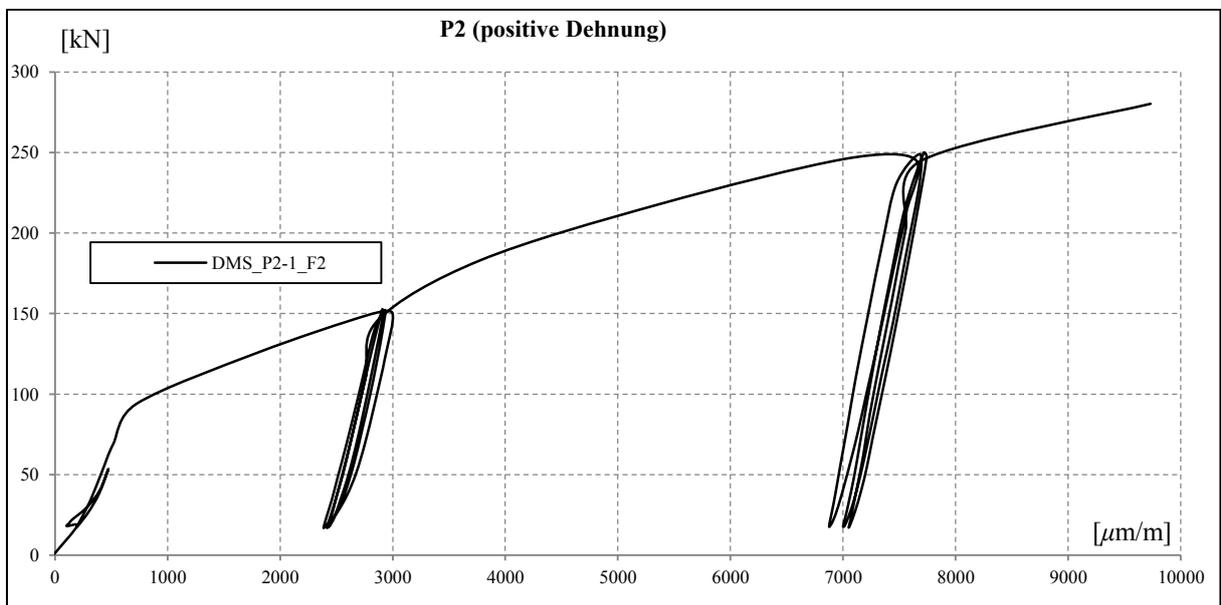
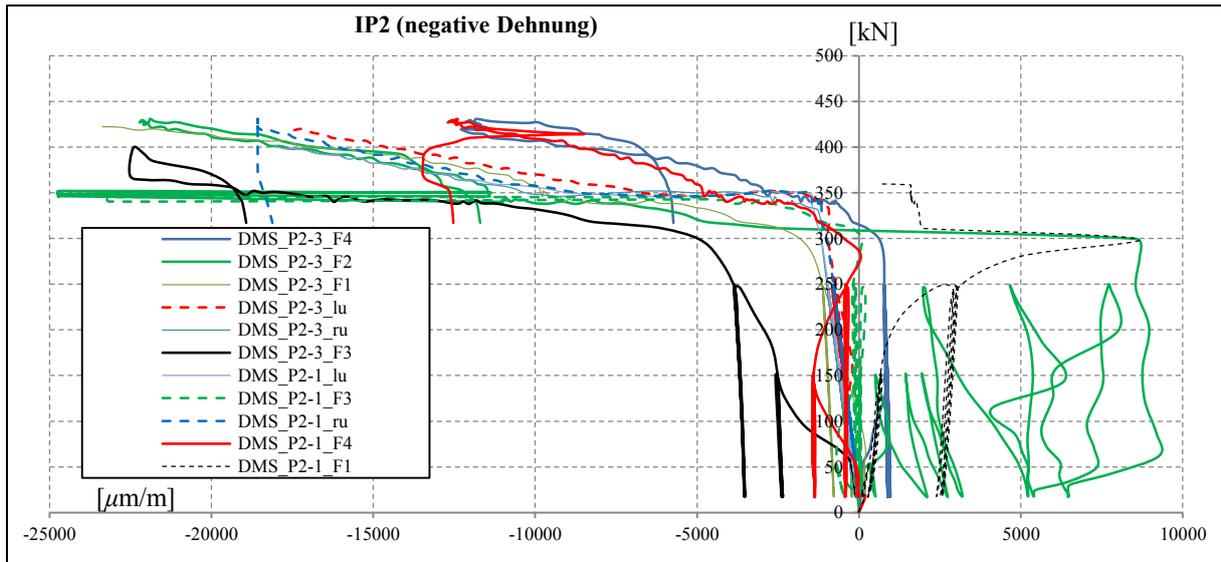
IP14

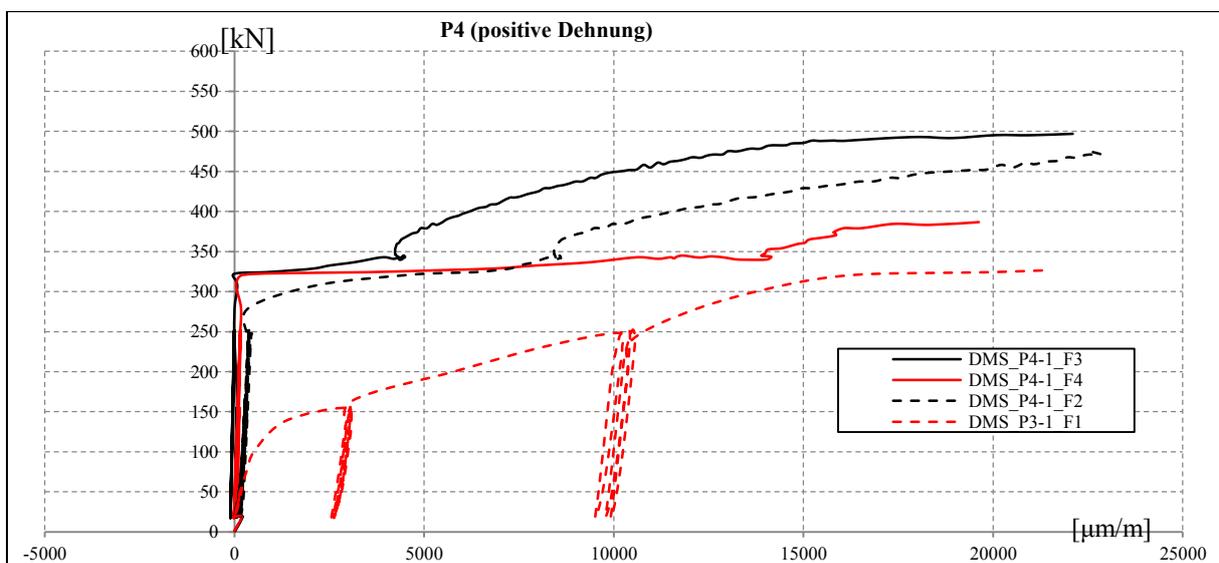
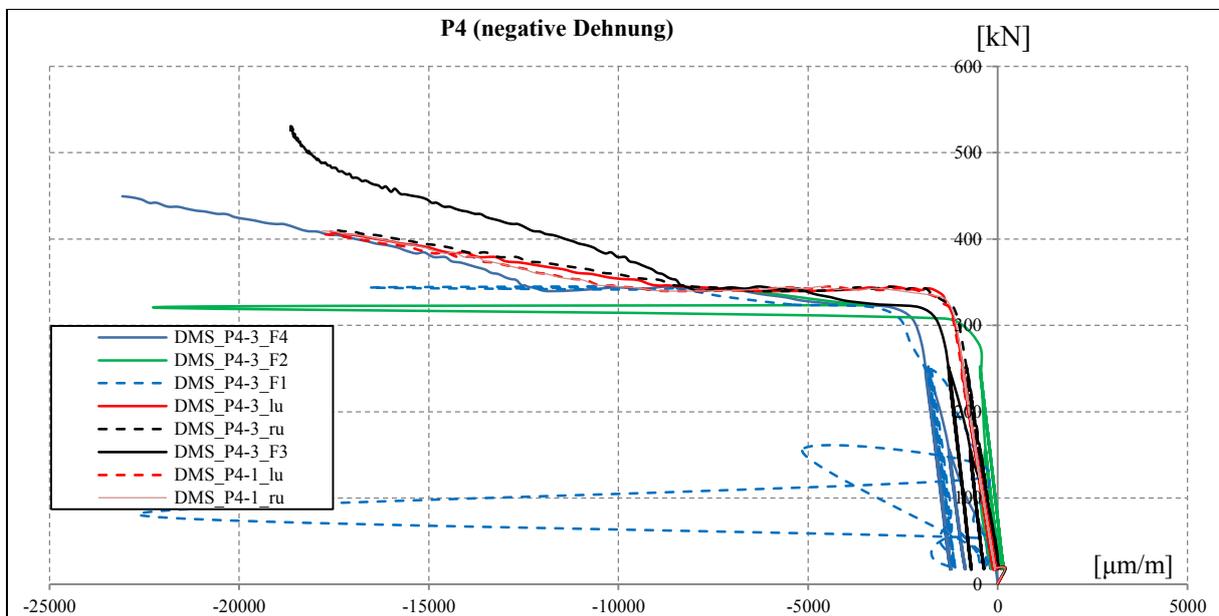
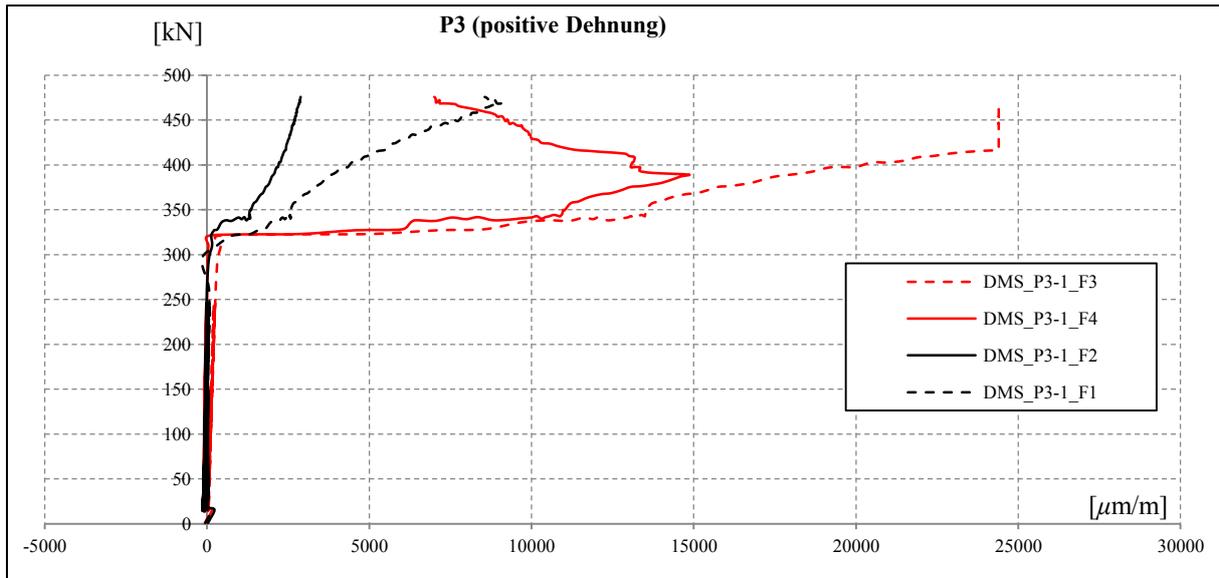


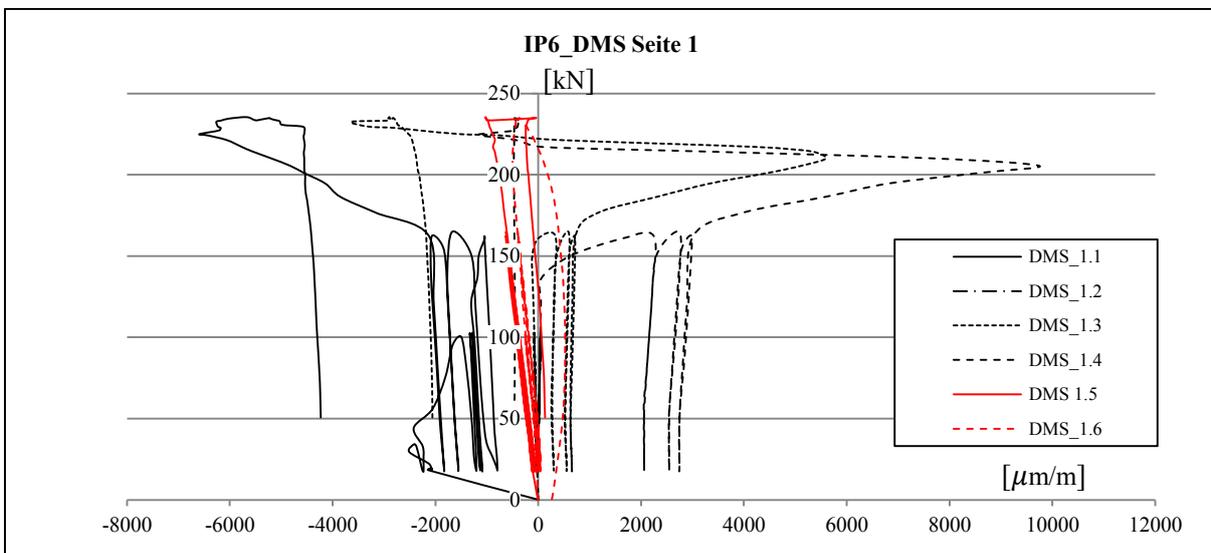
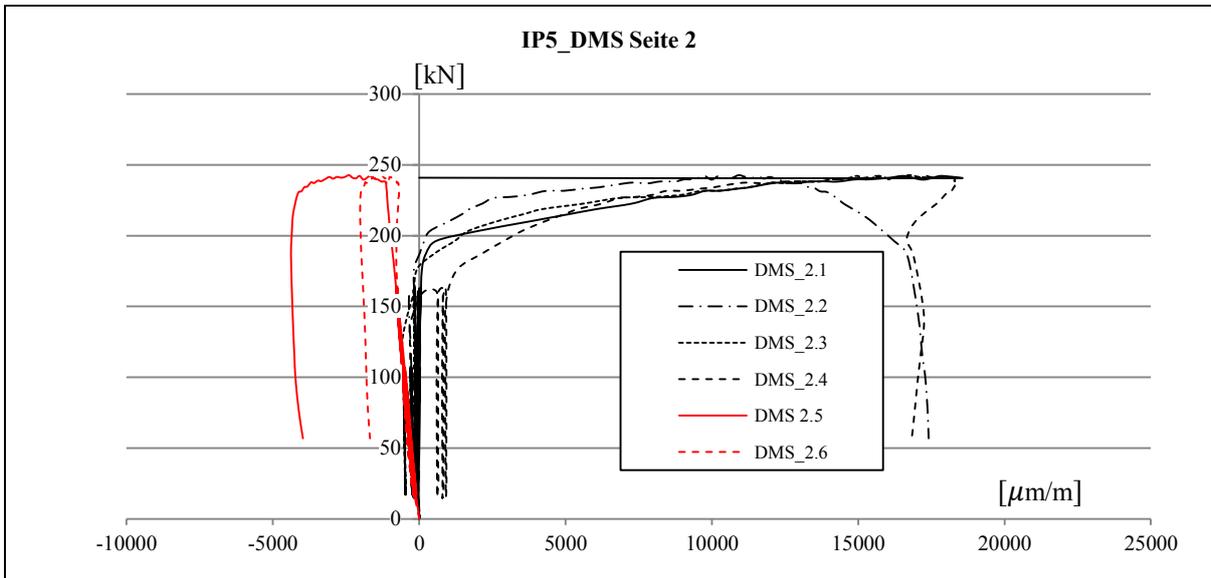
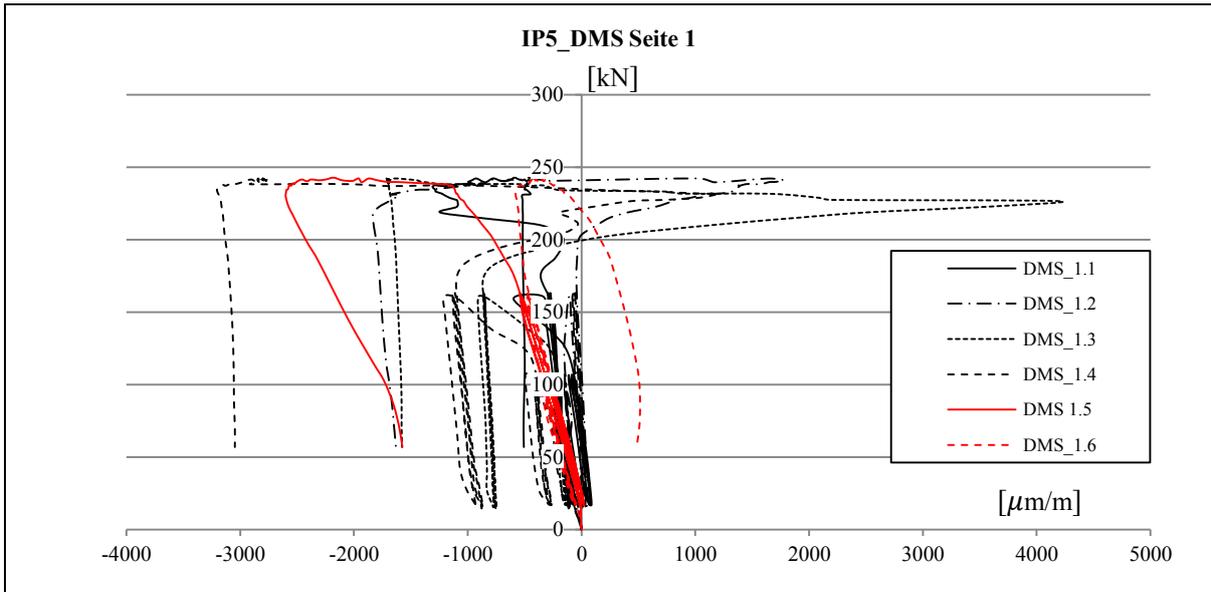
Referenzkörper

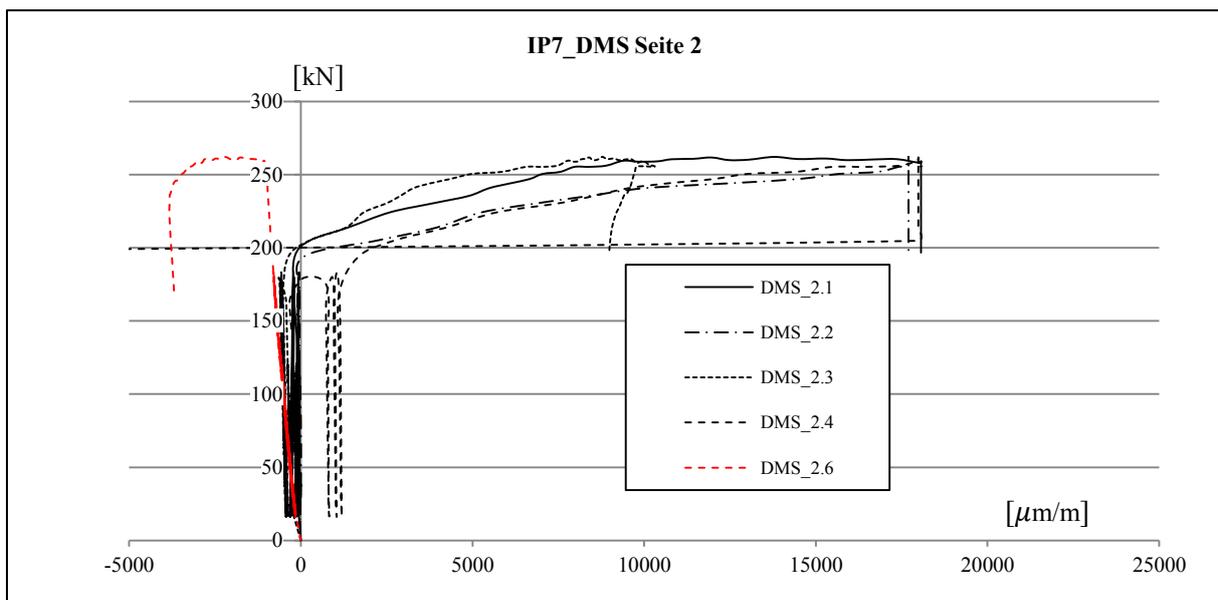
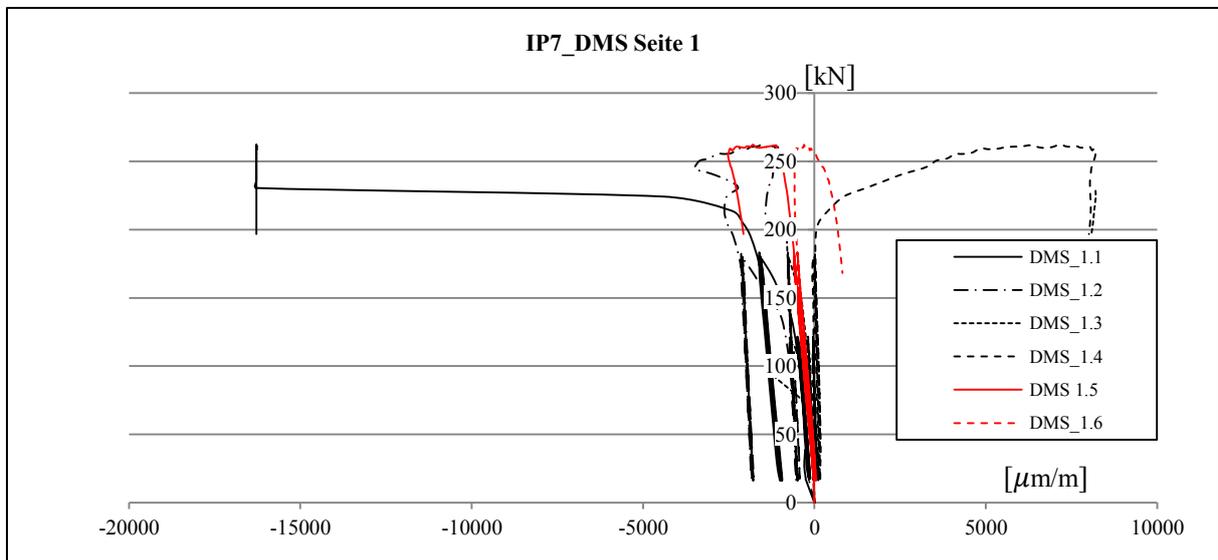
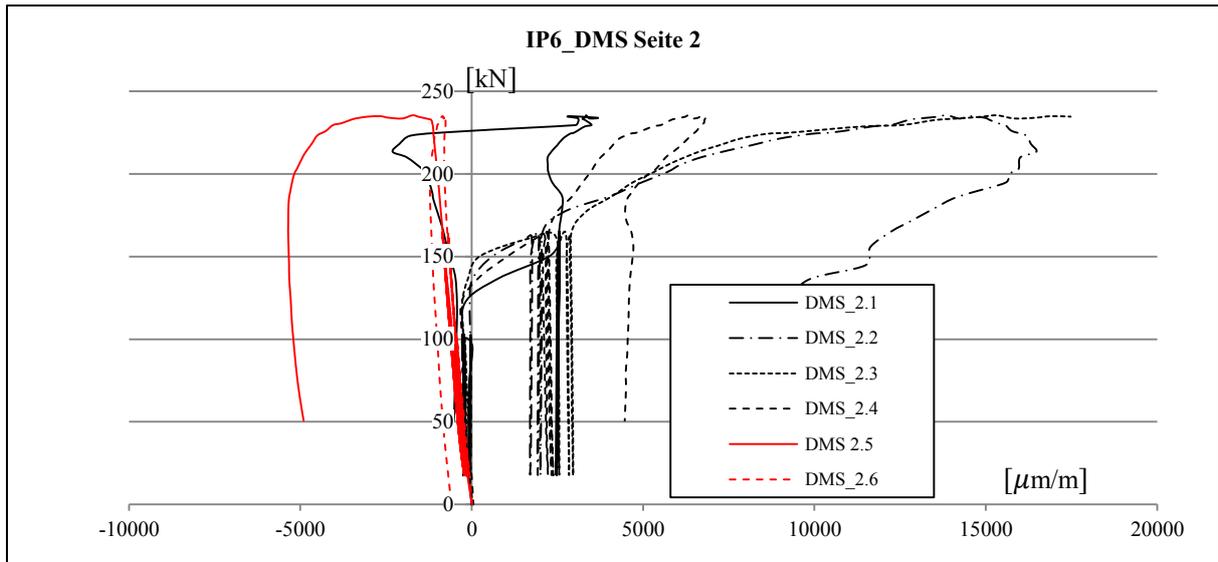


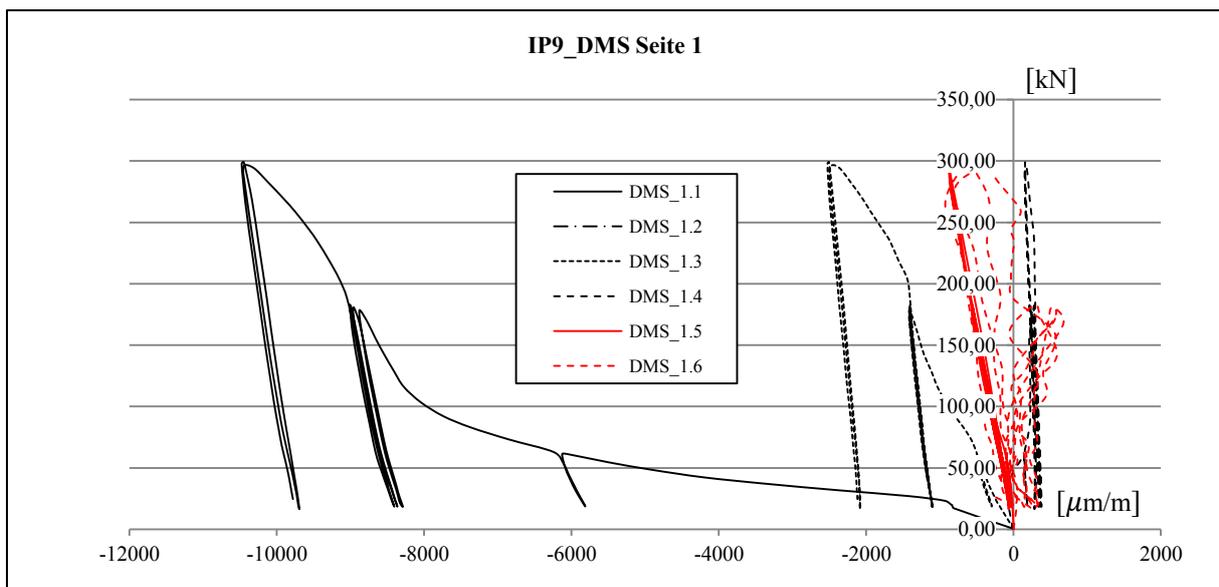
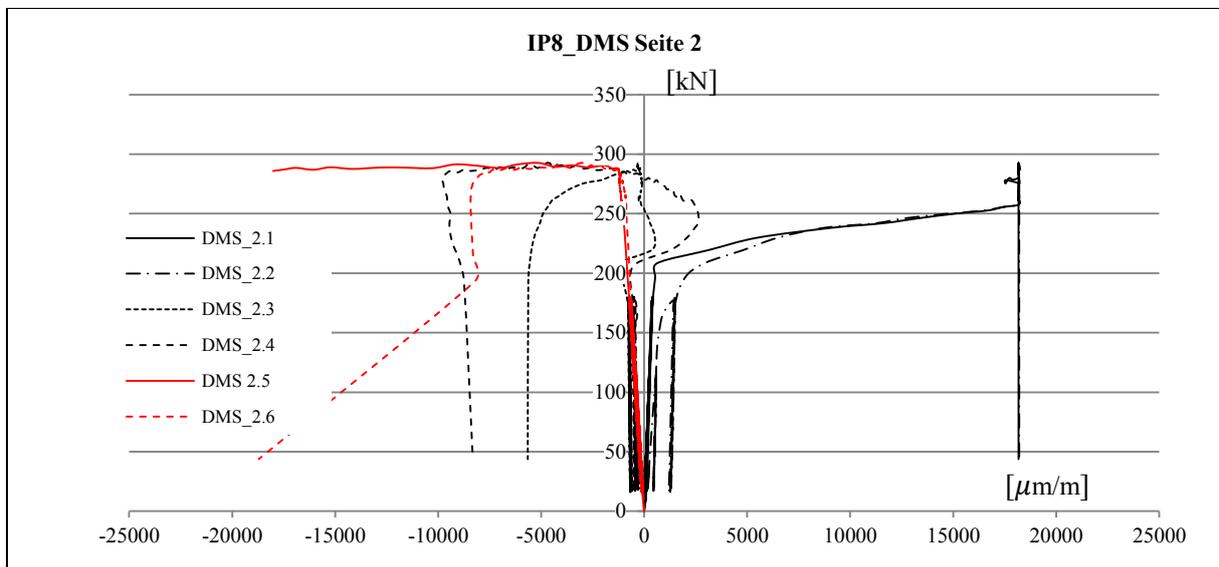
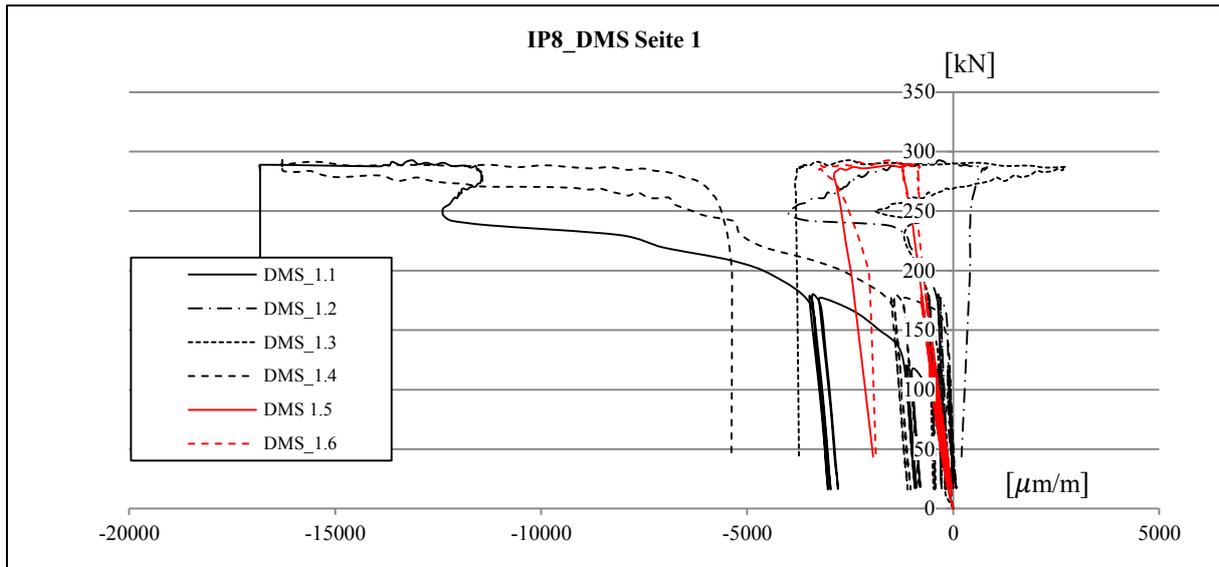


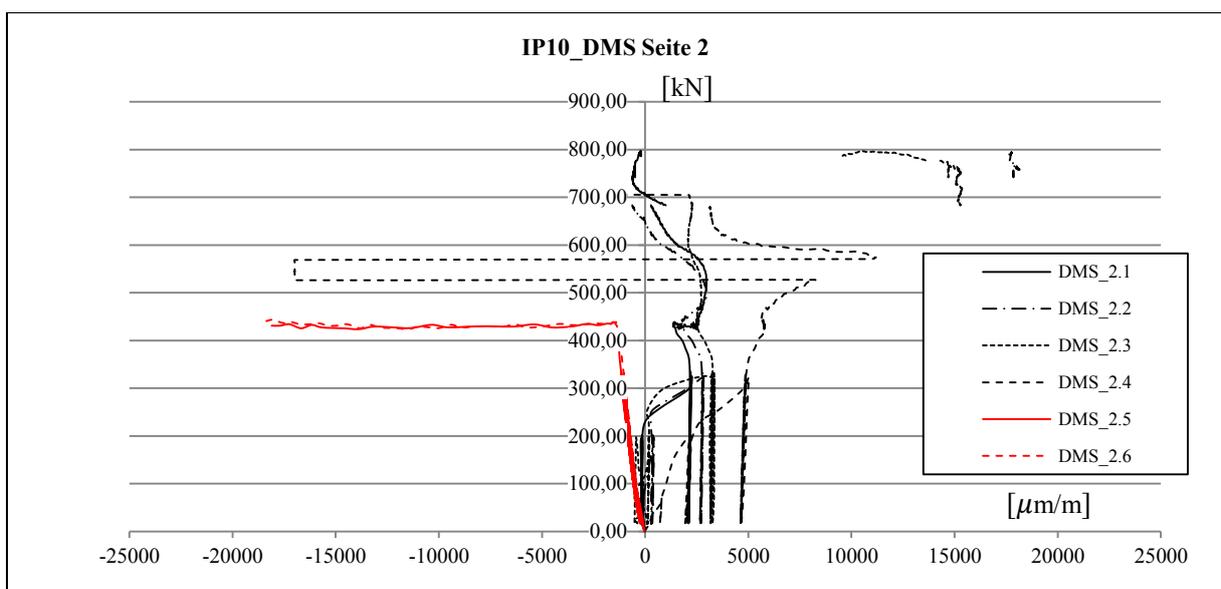
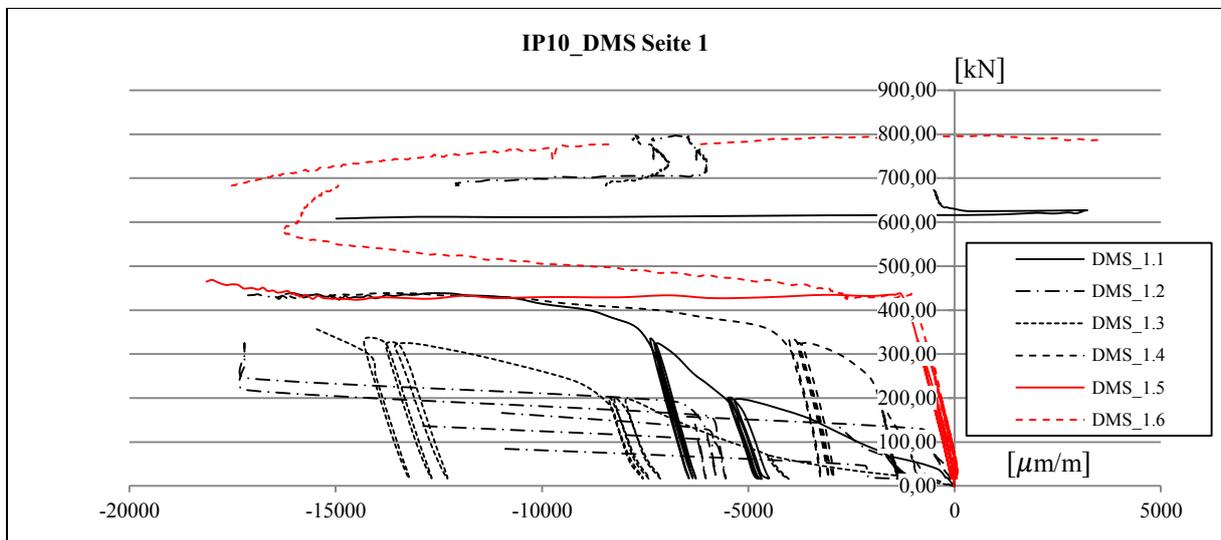
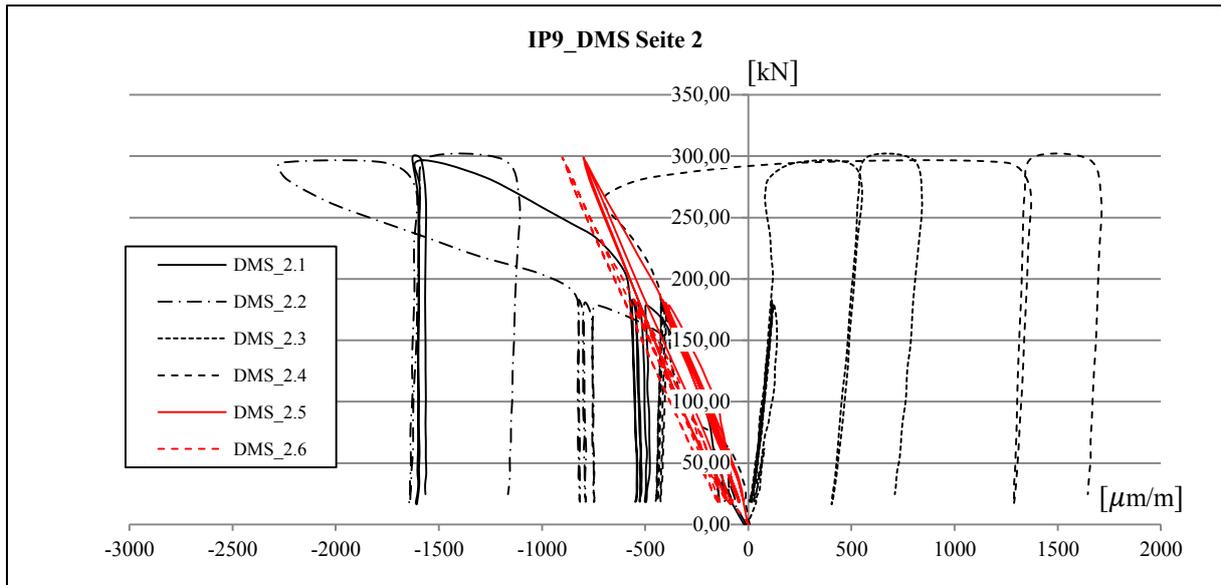


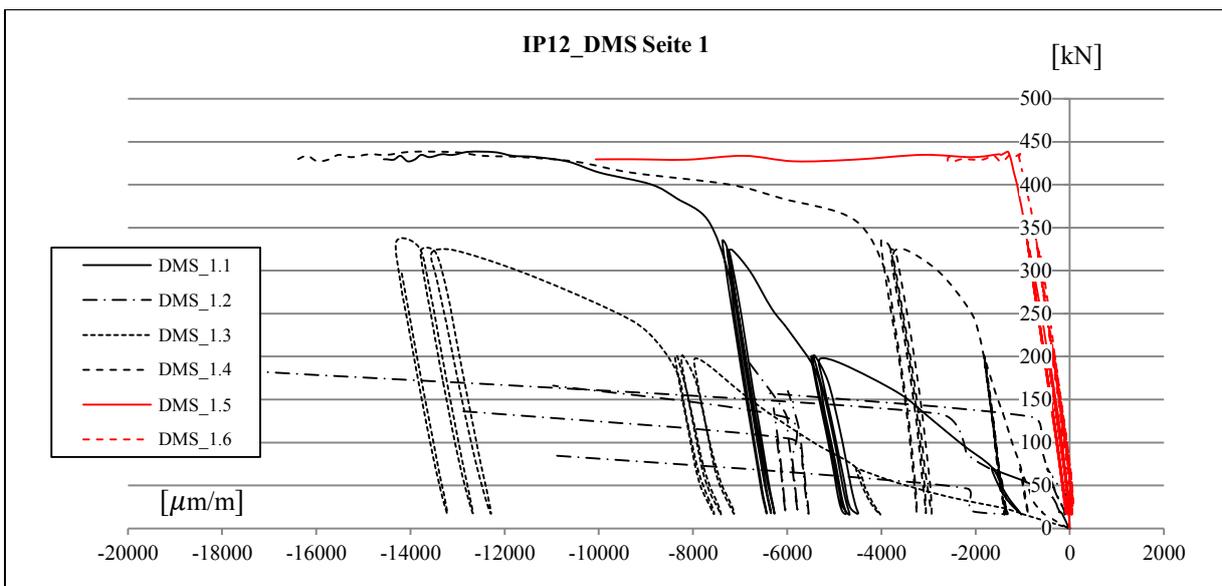
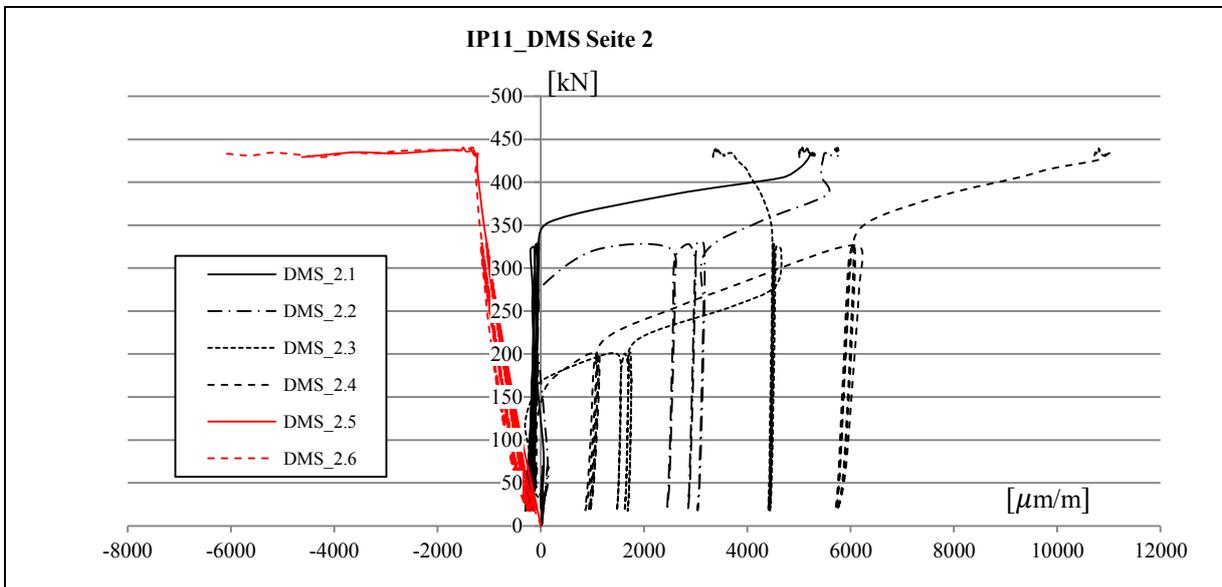
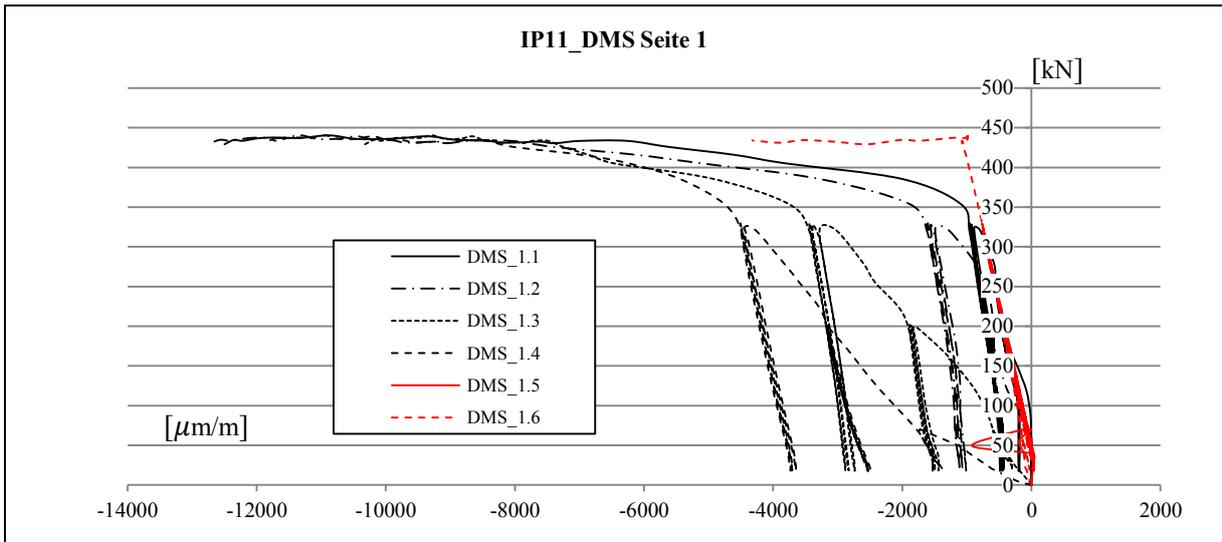


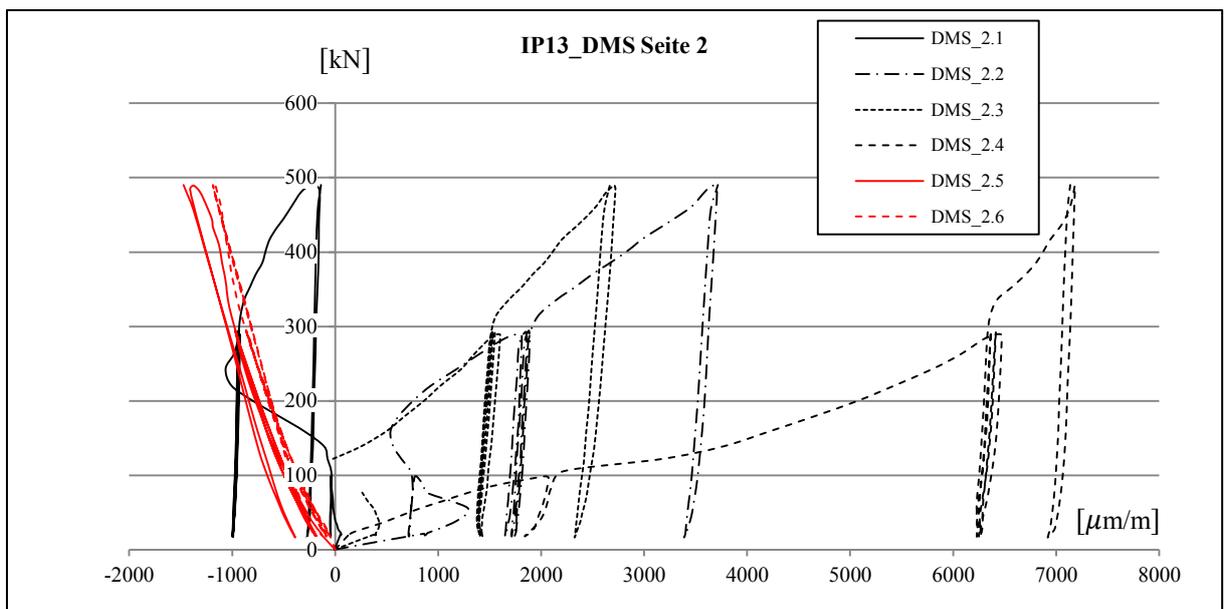
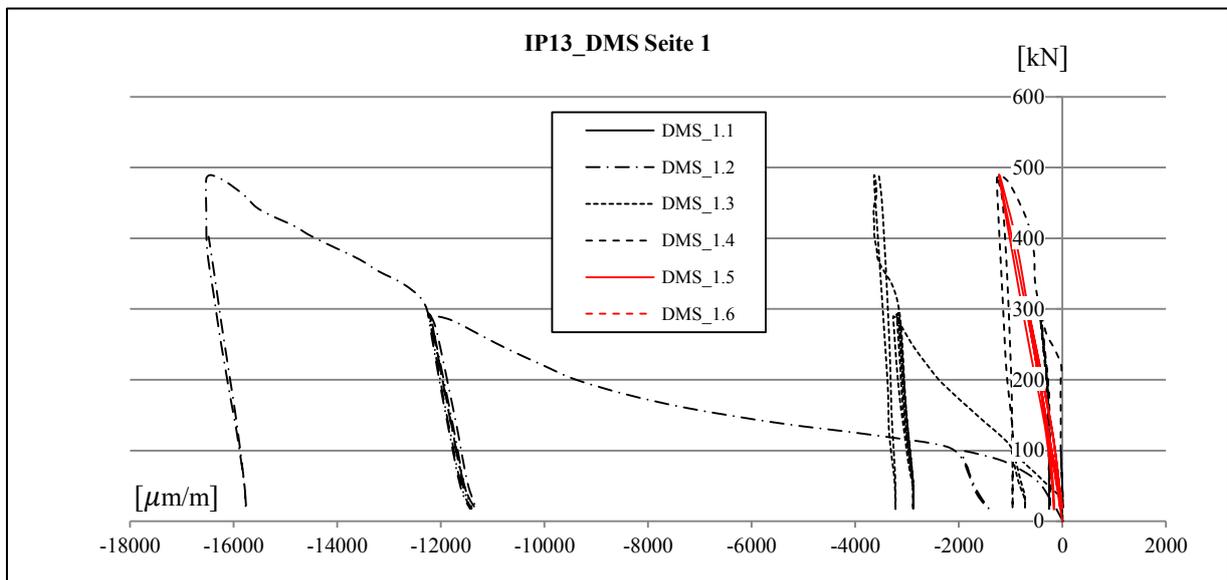
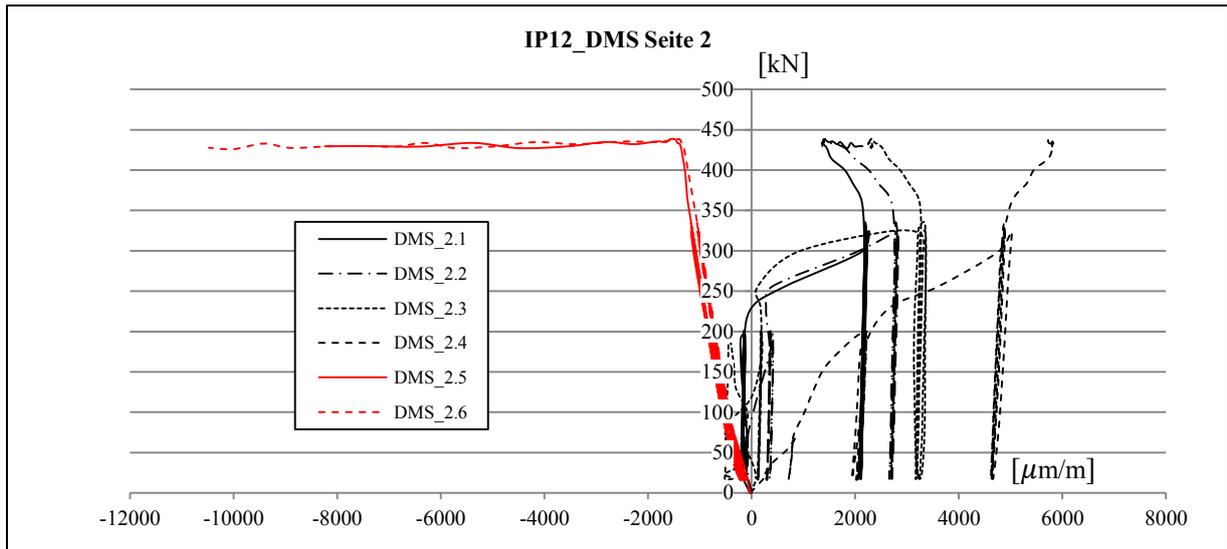


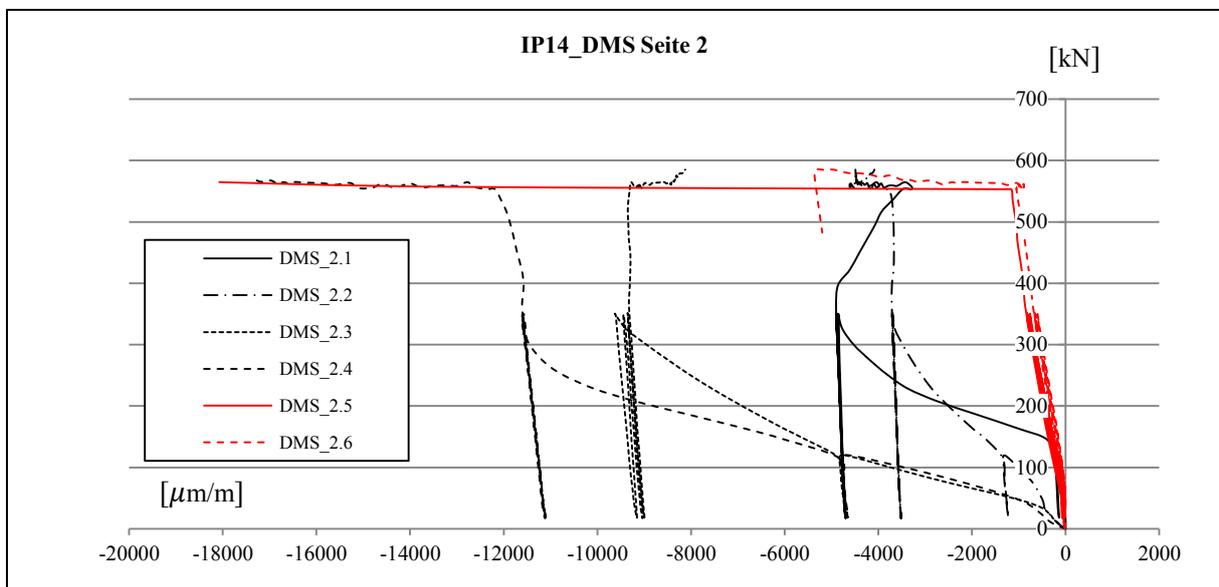
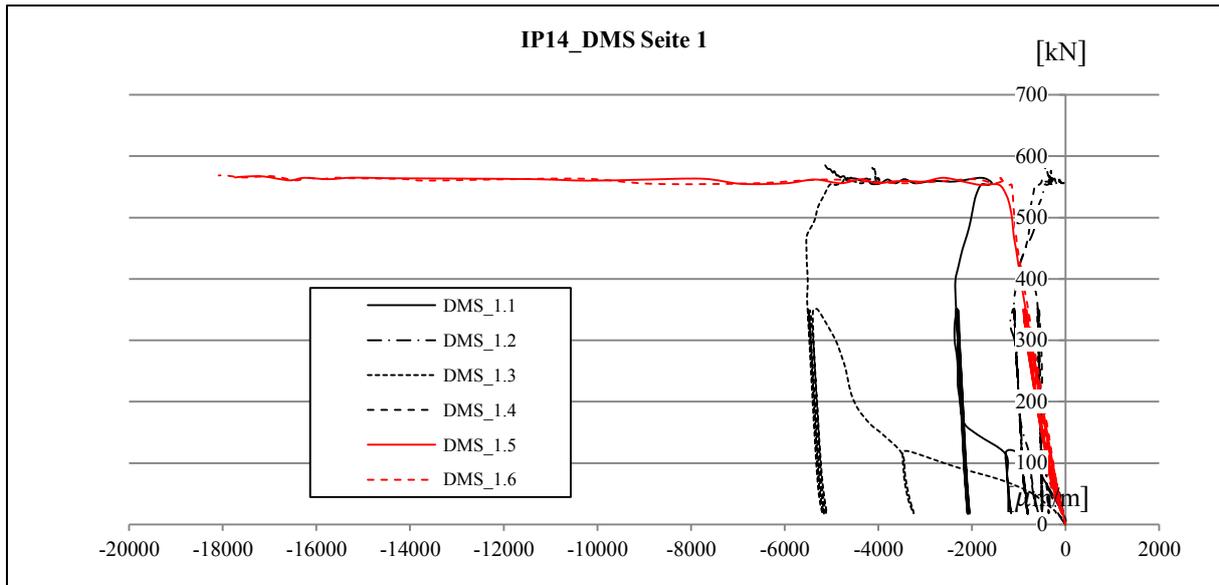












Anhang C2: Dokumentation Versuche Phase II

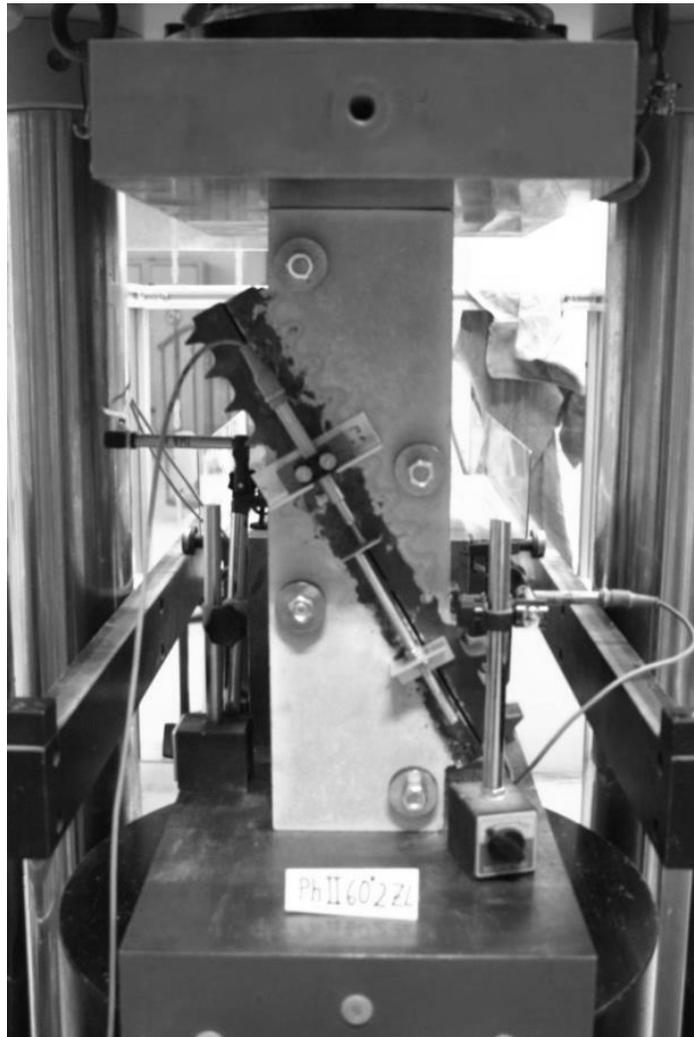


Abb.C2.1: Versuchsaufbau

Tab. C.2.1: Versuchsprogramm Phase II – Betonprismen mit Stahlzahnleistenpaaren

Versuchsnr.	Anzahl PK	Anzahl ZL	n Zahn S/B	Tiefe ZL [cm]	n Zahn S/S	Fugeneigung	Abmessungen PK			Material
							b [cm]	t [cm]	h [cm]	
II/R1	1	-	-	-	-	-	14	14	50	S235 Charge 1
II/R2	1	-	-	-	-	-	26	14	50	S235 Charge 1
II/R3	2	-	-	-	-	-	14	5	50	S235 Charge 1
II/R4	2	-	-	-	-	-	26	5	50	S235 Charge 1
II/P1	1	2	8	3,5	20 ^{*1}	30°	14	14	50	S235 Charge 1
II/P2	1	2	8	3,5	24	70°	26	14	50	S235 Charge 1
II/P3	2	1	8	5,0	12	30°	14	5	50	S235 Charge 1
II/P4	2	1	8	5,0	12	70°	26	5	50	S235 Charge 1

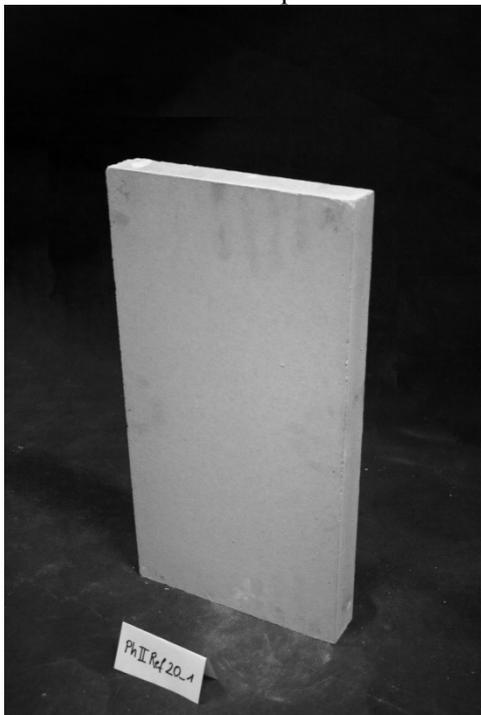
^{*1)} durch fehlerhaften Einbau tragen vier Zähne nicht mit
^{*2)} S/S = Stahl/Stahl-Verzahnung; S/B = Betonseitige Stahlverzahnung

Bezeichnung	PhII Ref - 70-1		
Beschreibung	Referenzkörper zum PK mit einer Zahnleiste, 20°. Homogener Betonkörper mit identischen Grundrissabmessungen wie Prisma mit einer Zahnleiste unter 20°.		
Herstelldatum	19.10.2016	Betonalter	32d
Prüfdatum	21.11.2016	Lagerung	an der Luft
Zylinderfestigkeit	121,35 [N/mm ²]		
Prüfmaschine	Lastrahmen Bauform 2031 (Toni Technik GmbH) 3,0 MN		
a x b [mm]	261,16 x 50,75		
A [cm ²]	132,54		
h [mm]	502		
Wegaufnehmer	2x vertikal		
Versagensart	Betondruckversagen über das gesamte Bauteil		
Bruchlast	[kN]	1168,81	
Bruchspannung	[N/mm ²]	88,19	

Belastungsgeschwindigkeit 0,6 mm/min = 0,01 mm/sek

Belastungsprotokoll s. Laststufen-Diagramm für 1 Zahnleiste im Kap. 4

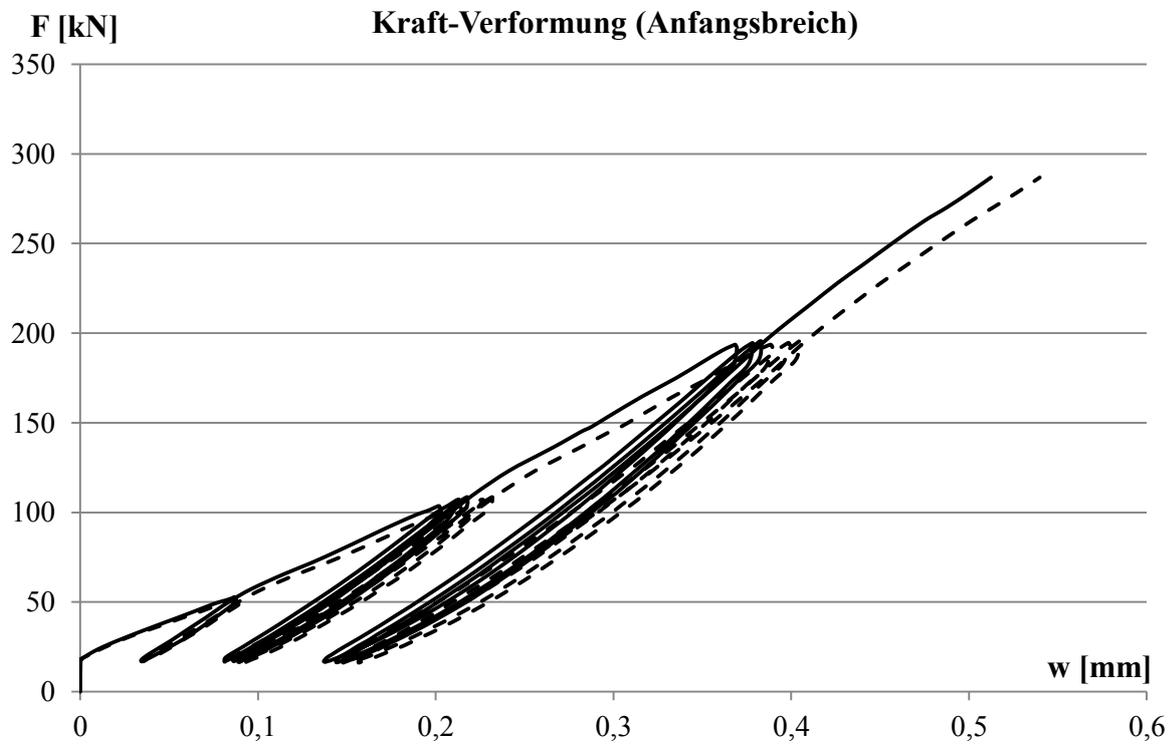
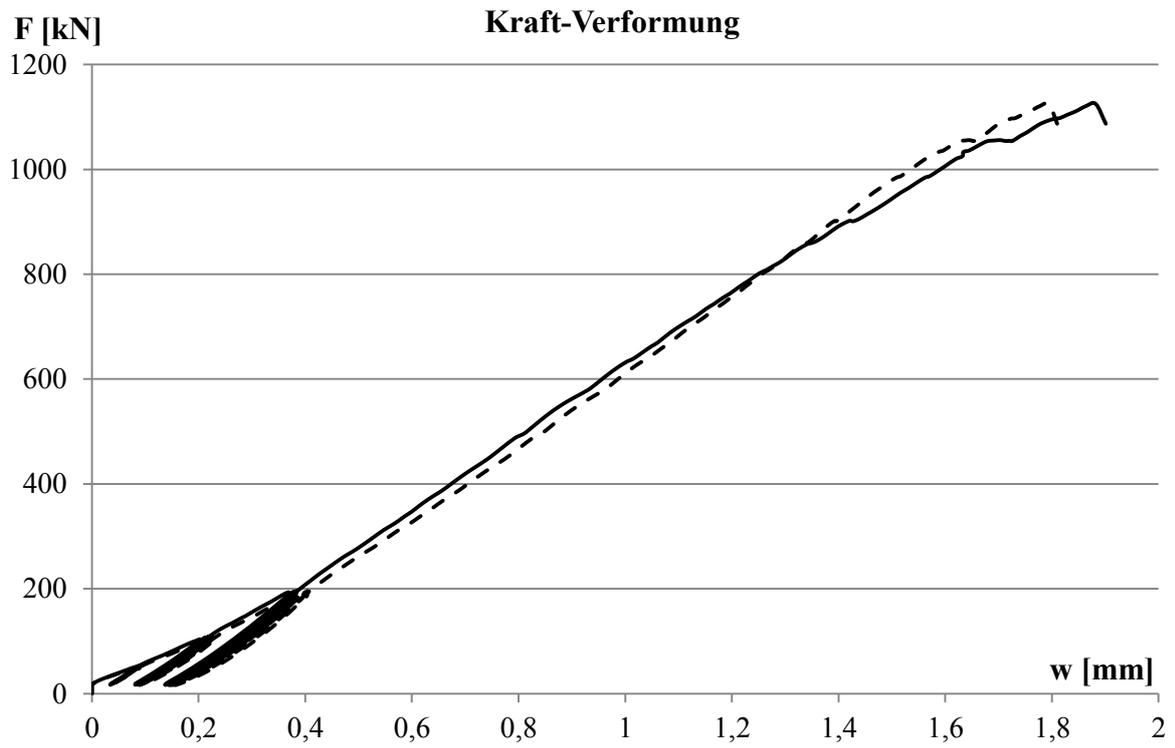
Probekörper



Bruchbild



PhII Ref - 70-1



Bezeichnung	PhII Ref - 70-2		
Beschreibung	Referenzkörper zum PK mit zwei Zahnleisten, 20°. Hohlraum in der Mitte, da die Kraft analog zum Prüfkörper nur über die seitlichen Stege abgetragen werden soll. Zusätzliche Sicherung durch Gewindestangen gegen Querkzugversagen.		
Herstelldatum	19.10.2016	Betonalter	32d
Prüfdatum	21.11.2016	Lagerung	an der Luft
Zylinderfestigkeit	121,35 [N/mm ²]		
Prüfmaschine	Lastrahmen Bauform 2031 (Toni Technik GmbH) 3,0 MN		
a x b [mm]	260,50 x 139,40	a _{eff} x b _{eff} [mm]	2 x 35 x 260,50
A [cm ²]	363,14	A _{eff} [cm ²]	182,35
h [mm]	501		
Wegaufnehmer	2x vertikal		
Versagensart	Leichte Risse an der Oberkante. Versagen durch Druckbruch in den Stegen. Es wird die effektive Betonfläche entlang der geneigten Stege maßgebend.		
Bruchlast	[kN]	1663,93	
Bruchspannung	[N/mm ²]	91,25	

Belastungsgeschwindigkeit 0,6 mm/min = 0,01 mm/sek

Belastungsprotokoll s. Laststufen-Diagramm für 2 Zahnleistenpaare im Kap. 4

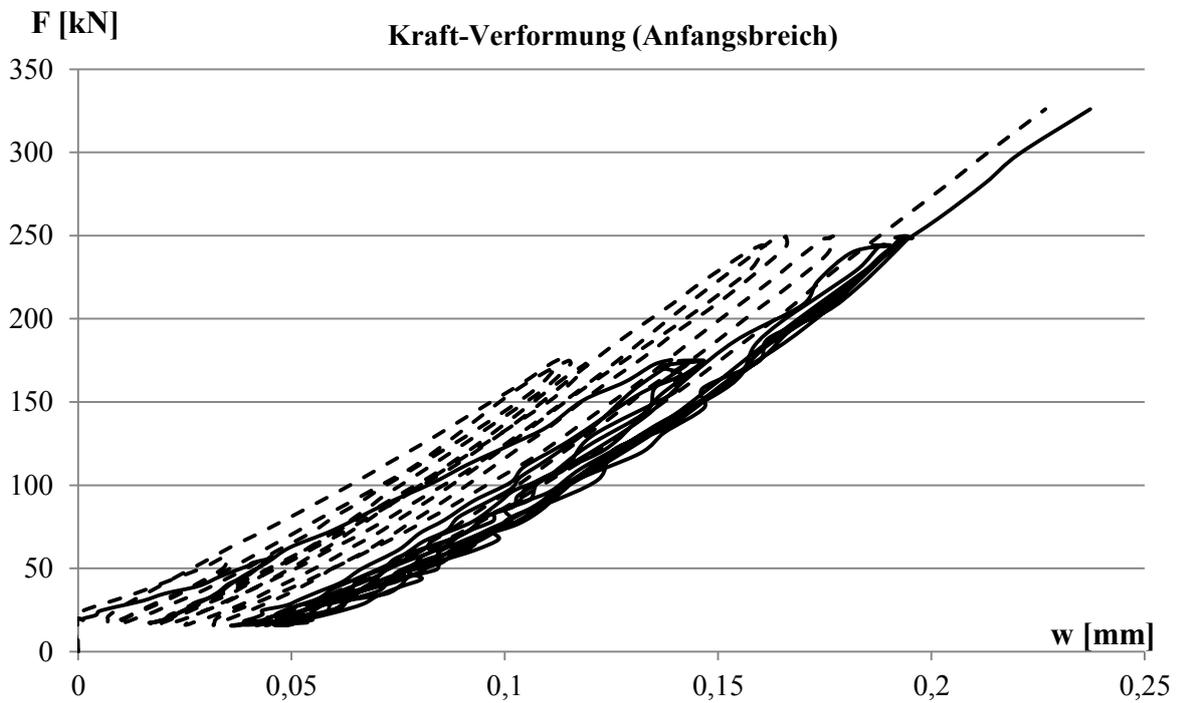
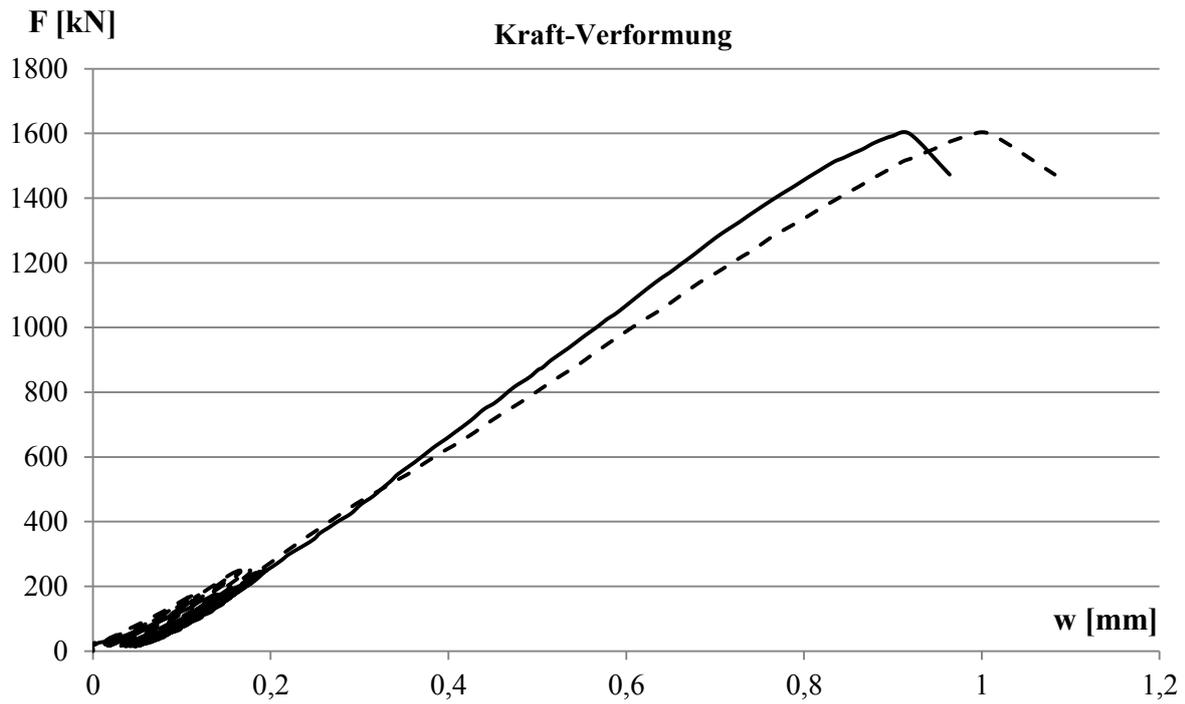
Probekörper



Bruchbild



PhII Ref - 70-2

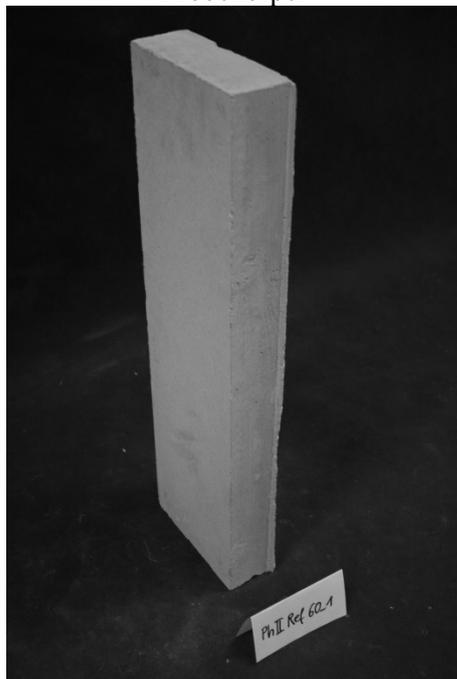


Bezeichnung	PhII - Ref - 30-1		
Beschreibung	Referenzkörper zum PK mit einer Zahnleiste, 60°. Homogener Betonkörper mit identischen Grundrissabmessungen wie Prisma mit einer Zahnleiste unter 20°.		
Herstelldatum	19.10.2016	Betonalter	32d
Prüfdatum	21.11.2016	Lagerung	an der Luft
Zylinderfestigkeit	121,35 [N/mm ²]		
Prüfmaschine	Lastrahmen Bauform 2031 (Toni Technik GmbH) 3,0 MN		
a x b [mm]	140,38 x 50,75		
A [cm ²]	71,24		
h [mm]	501		
Wegaufnehmer	2x vertikal		
Versagensart	Starke Betonabplatzungen am Fußpunkt des Probekörpers. Vermutlich durch Entmischung in diesem Bereich		
Bruchlast	[kN]	471,29	
Bruchspannung	[N/mm ²]	66,16	

Belastungsgeschwindigkeit 0,6 mm/min = 0,01 mm/sek

Belastungsprotokoll s. Laststufen-Diagramm für 1 Zahnleistenpaar im Kap. 4

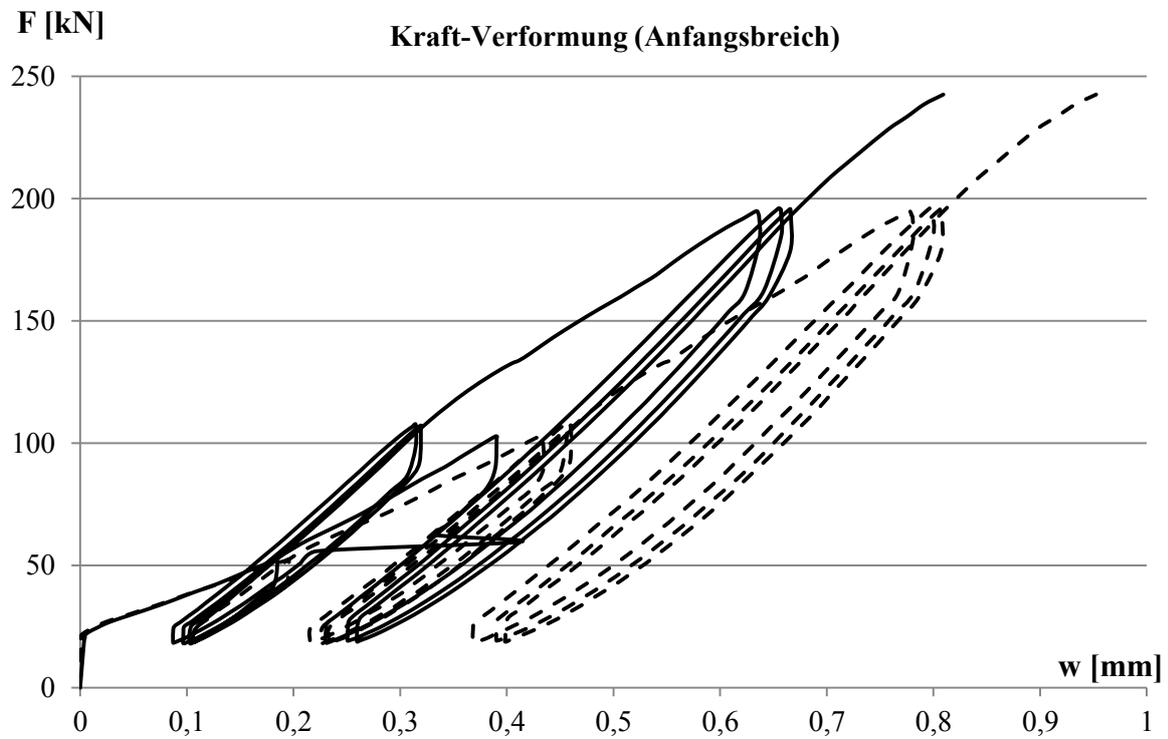
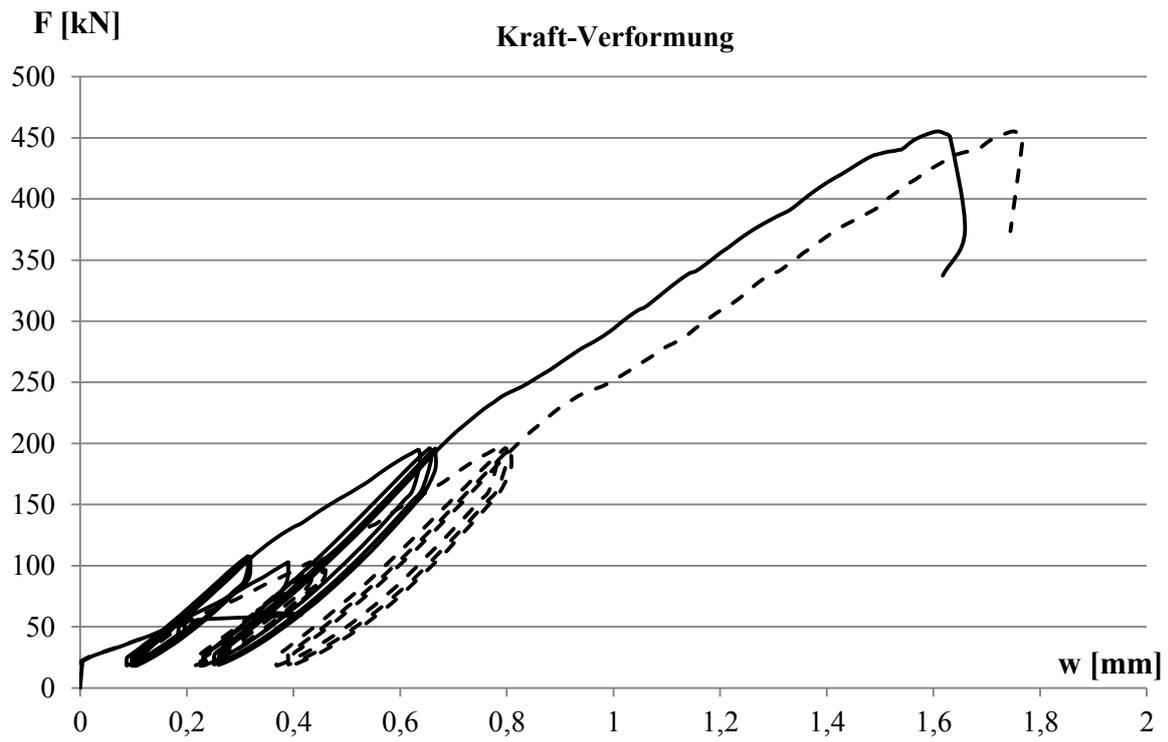
Probekörper



Bruchbild



PhII - Ref - 30-1



Bezeichnung	PhII - Ref - 30-2		
Beschreibung	Referenzkörper zum PK mit zwei Zahnleisten, 60°. Hohlraum in der Mitte, da die Kraft analog zum Prüfkörper nur über die seitlichen Stege abgetragen werden soll. Zusätzliche Sicherung durch Gewindestangen gegen Querkzugversagen.		
Herstelldatum	19.10.2016	Betonalter	32d
Prüfdatum	21.11.2016	Lagerung	an der Luft
Zylinderfestigkeit	121,35 [N/mm ²]		
Prüfmaschine	Lastrahmen Bauform 2031 (Toni Technik GmbH) 3,0 MN		
a x b [mm]	139,88 x 140,59	a _{eff} x b _{eff} [mm]	2 x 35 x 140,59
A [cm ²]	196,66	A _{eff} [cm ²]	98,41
h [mm]	501		
Wegaufnehmer	2x vertikal		
Versagensart	Leichte Risse aus Querkzug, da die Gewindestangen zu weit von der Aussparung angebracht sind. Prüfkörper schert entlang der Stege ab. Es wird die effektive Betonfläche maßgebend.		
Bruchlast	[kN]	792,40	
Bruchspannung	[N/mm ²]	80,52	

Belastungsgeschwindigkeit 0,6 mm/min = 0,01 mm/sek

Belastungsprotokoll s. Laststufen-Diagramm für 2 Zahnleistenpaare im Kap. 4

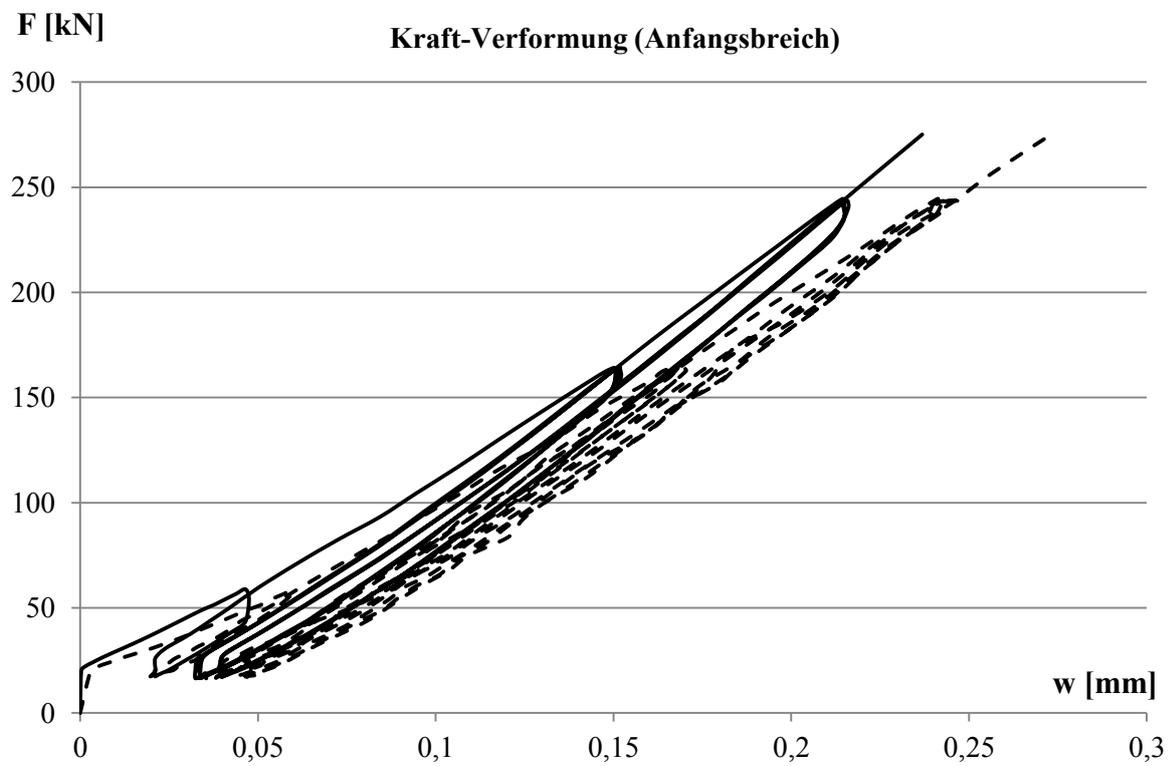
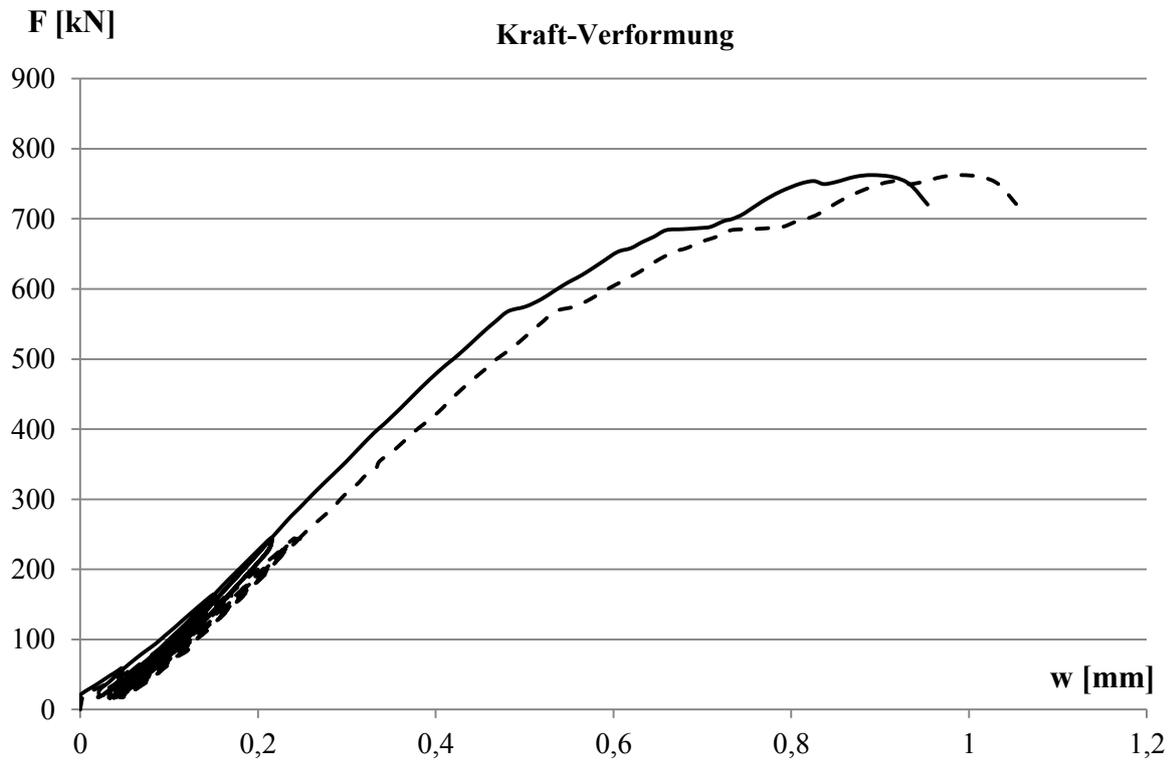
Probekörper



Bruchbild



PhII - Ref - 30-2



Verschiebungsrichtungen

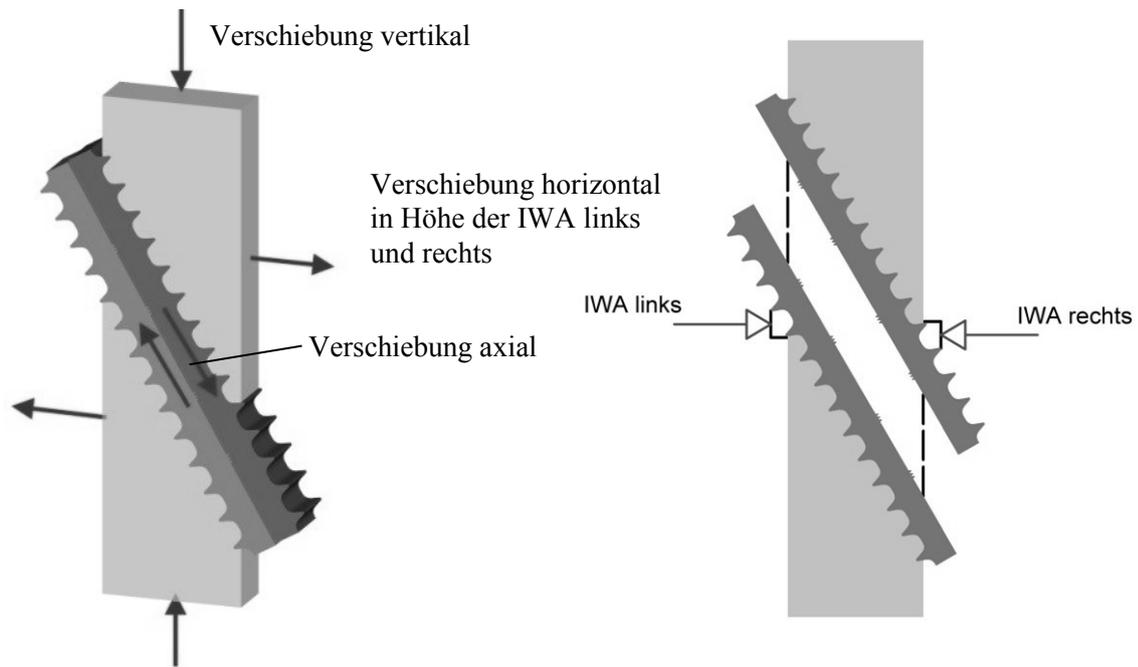


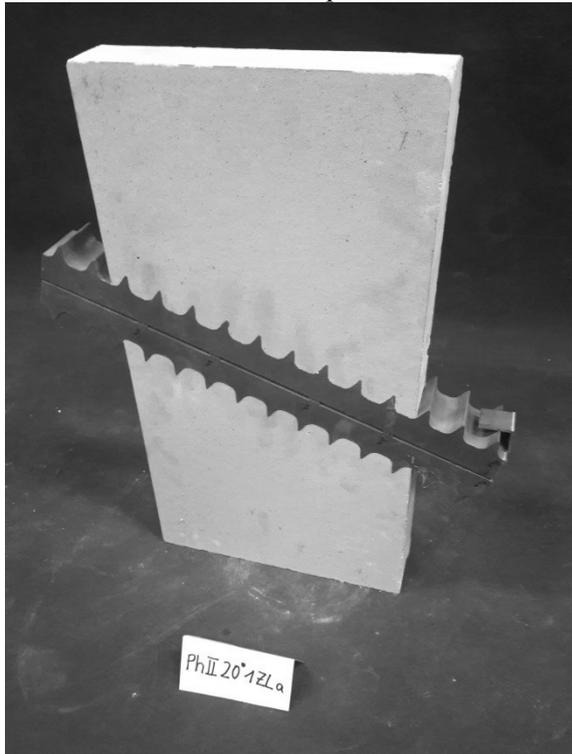
Abb.C.2.4: Probekörper mit Verschiebungsrichtungen

Vorzeichenregelung	F	ε
Negativ	Zug	Dehnung
Positiv	Druck	Stauchung

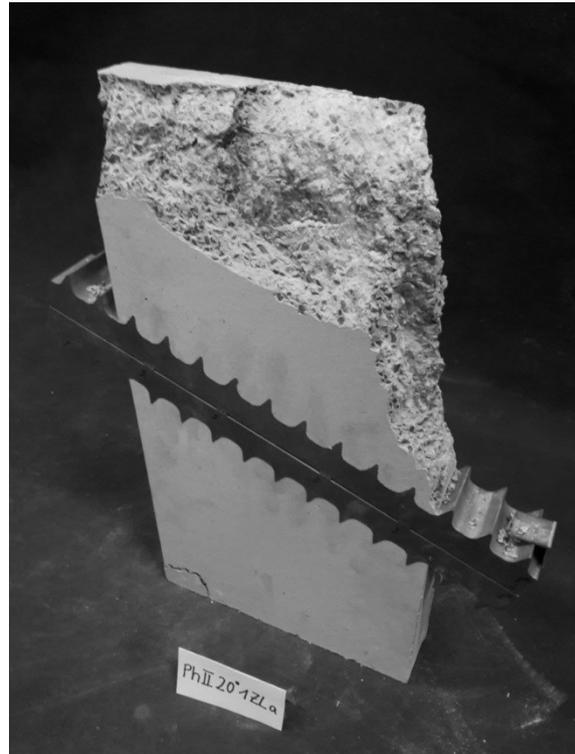
Bezeichnung		PhII - 70°-1ZL-a	
Beschreibung		1 Zahnleistenpaar, 20° Betonkörper mit einem unter 20° geneigten Zahnleistenpaar	
Herstelldatum	19.10.2016	Betonalter	33d
Prüfdatum	22.11.2016	Lagerung	an der Luft
Zylinderfestigkeit	121,35 [N/mm ²]		
Prüfmaschine	Lastrahmen Bauform 2031 (Toni Technik GmbH) 3,0 MN		
a x b [mm]	260,64 x 49,60		
A [cm ²]	129,28		
h [mm]	500		
Wegaufnehmer	2x horizontal 1x vertikal 1x axial		
Versagensart	Leichte Abplatzungen an der Unterkante, starke Abplatzungen an der Oberkante durch Schiefstellung des gesamten Probekörpers. Zähne werden leicht ineinander gestaucht und plastisch verformt. Der Beton wird maßgebendes Element.		
Bruchlast	[kN]	1030,29	
Bruchspannung	[N/mm ²]	79,69 (Spannung im Beton)	
Belastungsgeschwindigkeit	0,6 mm/min = 0,01 mm/sek		
Belastungsprotokoll	s. Laststufen-Diagramm für 1 Zahnleistenpaar im Kap. 4		

PhII - 70°-1ZL-a

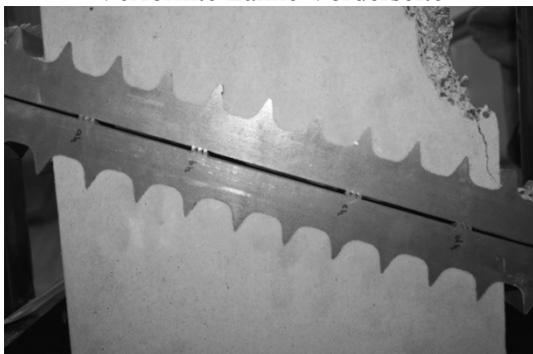
Probekörper



Bruchbild



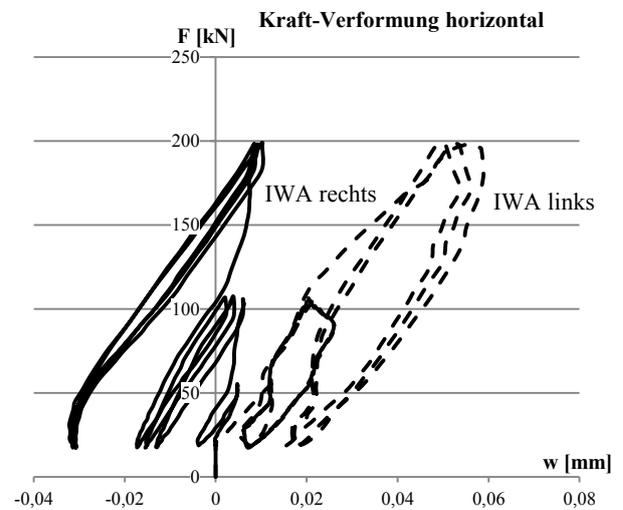
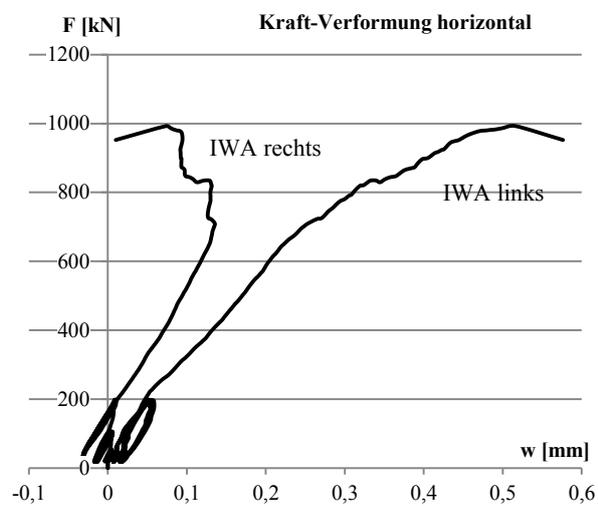
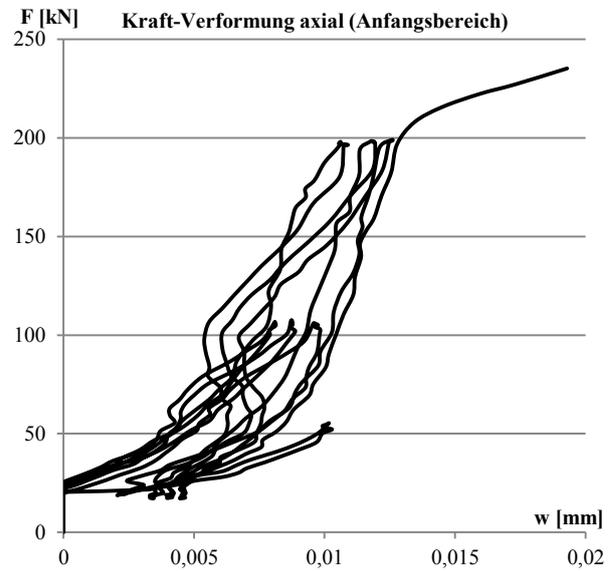
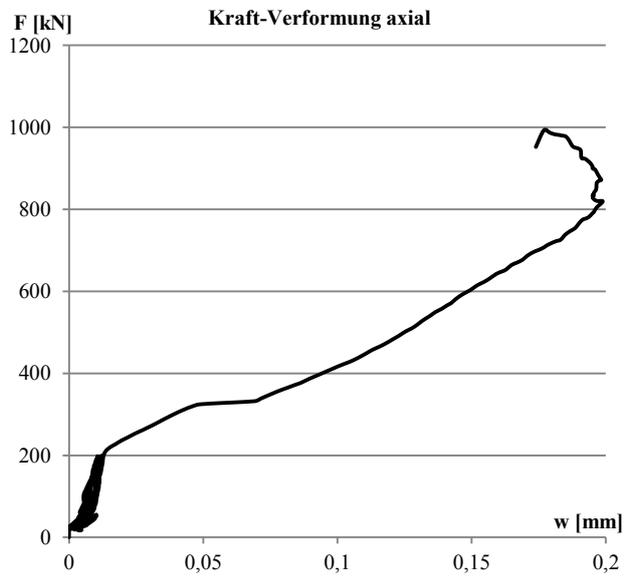
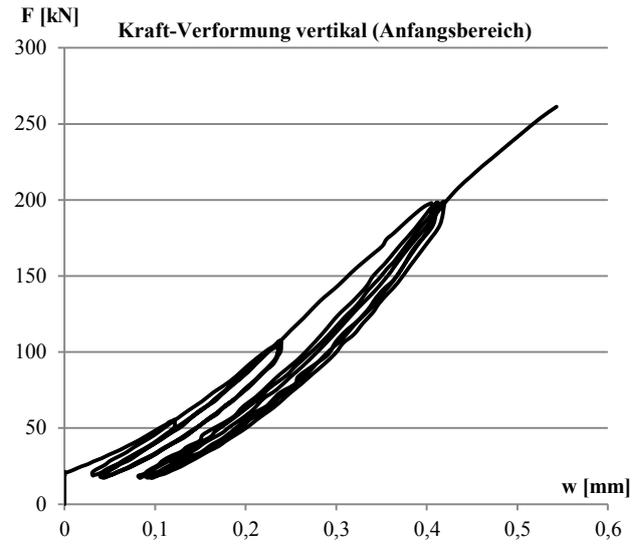
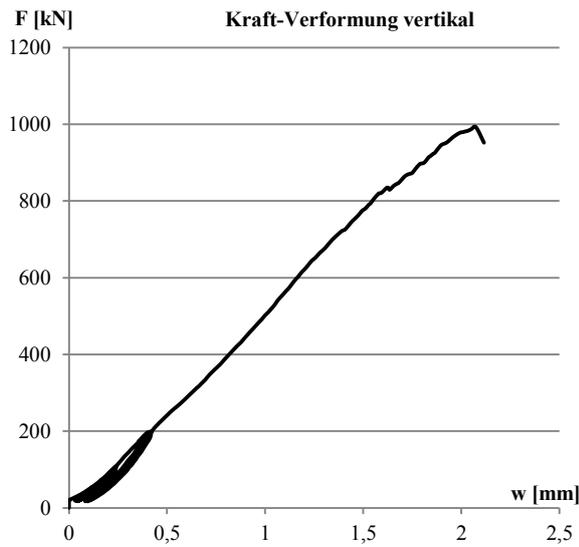
Verformte Zähne Vorderseite



Verformte Zähne Rückseite



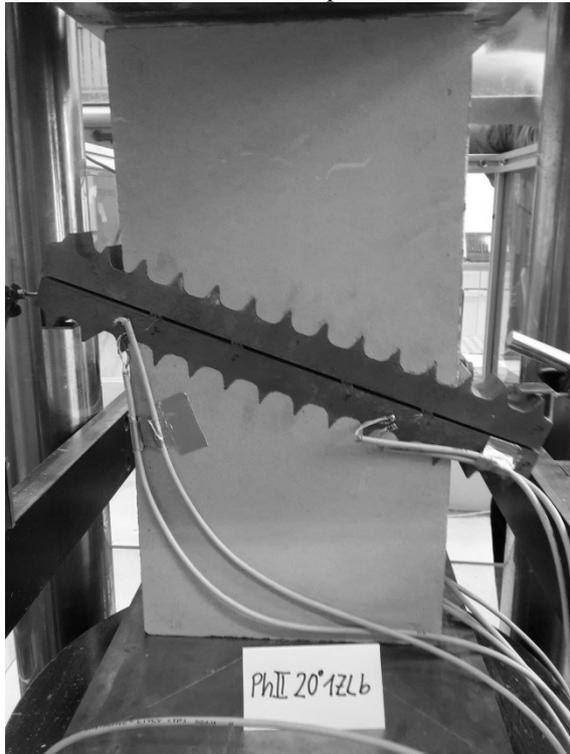
PhII - 70°-1ZL-a



Bezeichnung		PhII - 70°-1ZL-b	
Beschreibung		1 Zahnleistenpaar, 20° Betonkörper mit einem unter 20° geneigten Zahnleistenpaar mit Dehnungsmessstreifen	
Herstelldatum	19.10.2016	Betonalter	34d
Prüfdatum	23.11.2016	Lagerung	an der Luft
Zylinderfestigkeit	121,35 [N/mm ²]		
Prüfmaschine	Lastrahmen Bauform 2031 (Toni Technik GmbH) 3,0 MN		
a x b [mm]	261,48 x 50,33		
A [cm ²]	131,60		
h [mm]	501		
Wegaufnehmer	2x horizontal 1x vertikal 1x axial		
Versagensart	Leichte Abplatzungen an der Ober- und starke Abplatzungen an der Unterkante ab 100 kN, die stetig zunehmen. Abplatzungen am Eckzahn Beton – Stahl. Sprödes Versagen des Betons an der Unterkante.		
Bruchlast	[kN]	1058,63	
Bruchspannung	[N/mm ²]	80,44 (Spannung im Beton)	
Belastungsgeschwindigkeit	0,6 mm/min = 0,01 mm/sek		
Belastungsprotokoll	s. Laststufen-Diagramm für 1 Zahnleistenpaar im Kap. 4		

PhII - 70°-1ZL-b

Probekörper



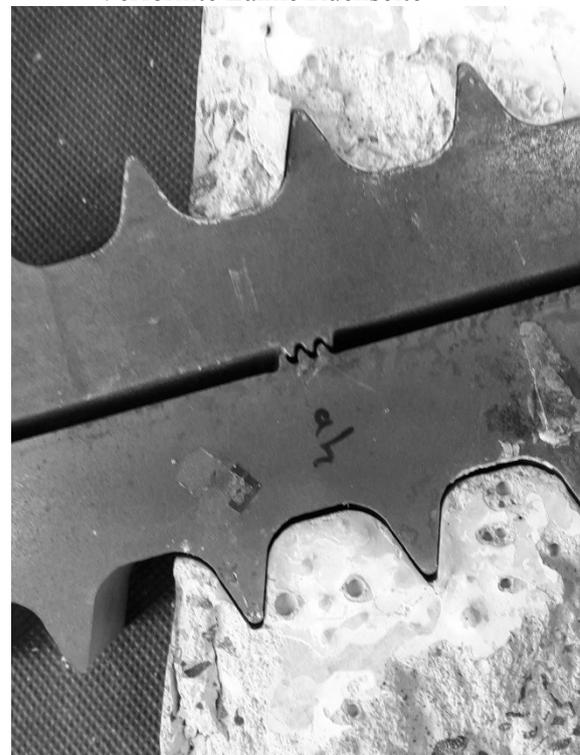
Bruchbild



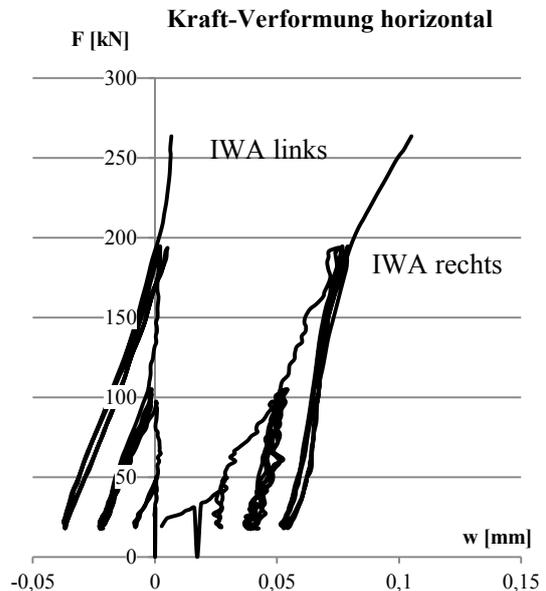
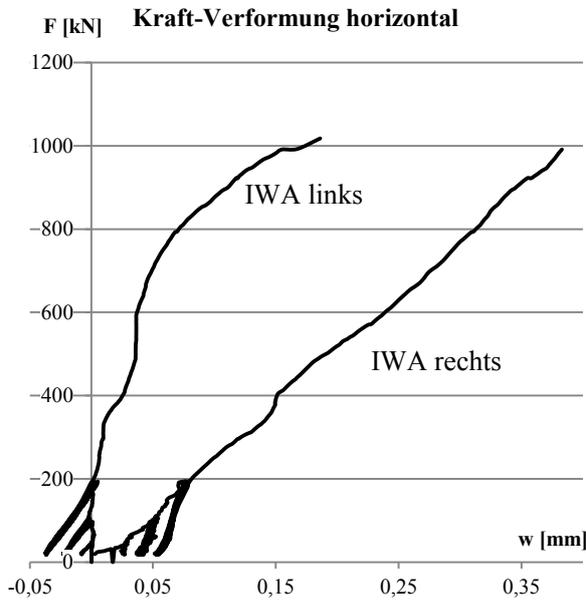
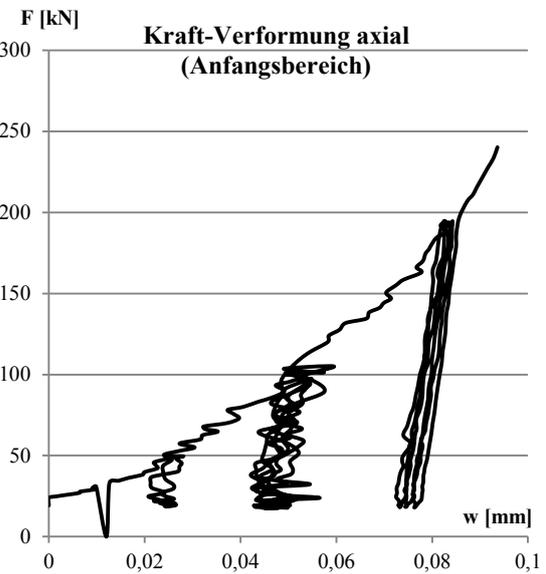
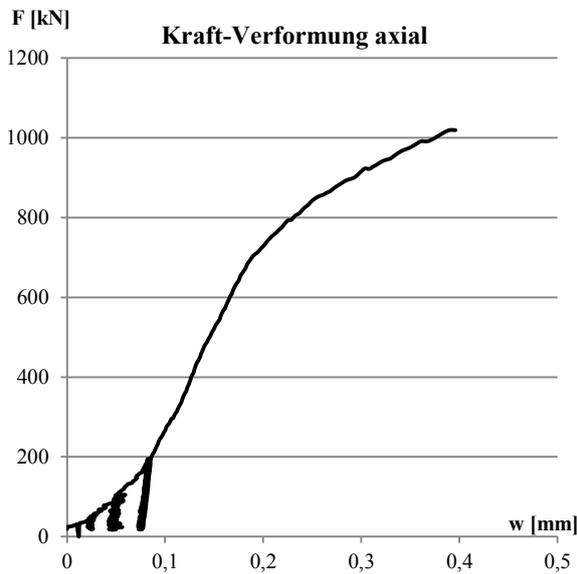
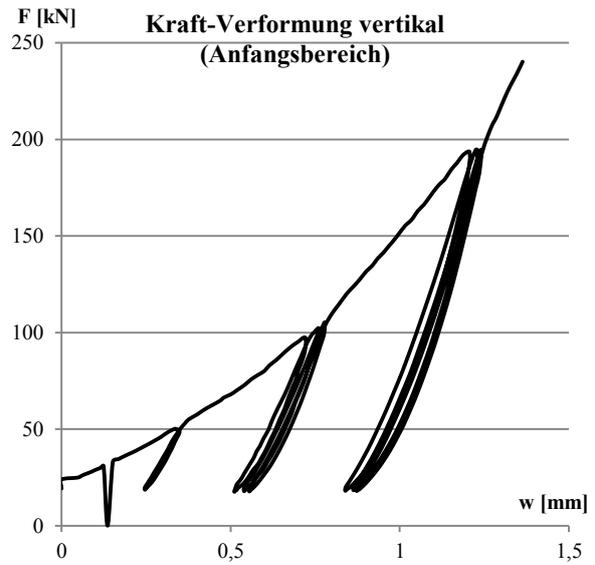
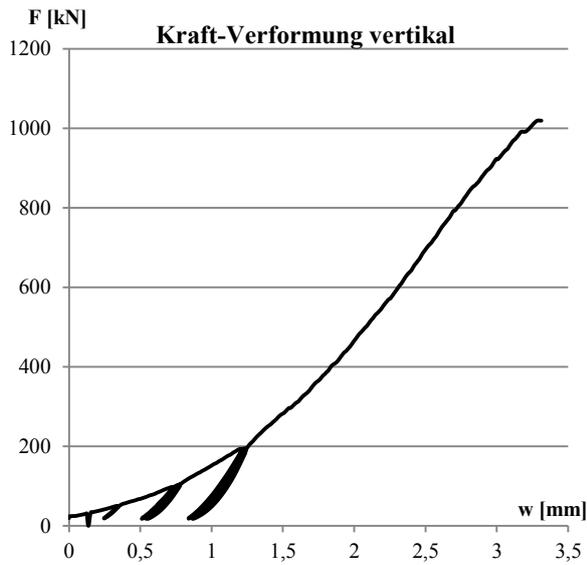
Verformte Zähne Vorderseite



Verformte Zähne Rückseite

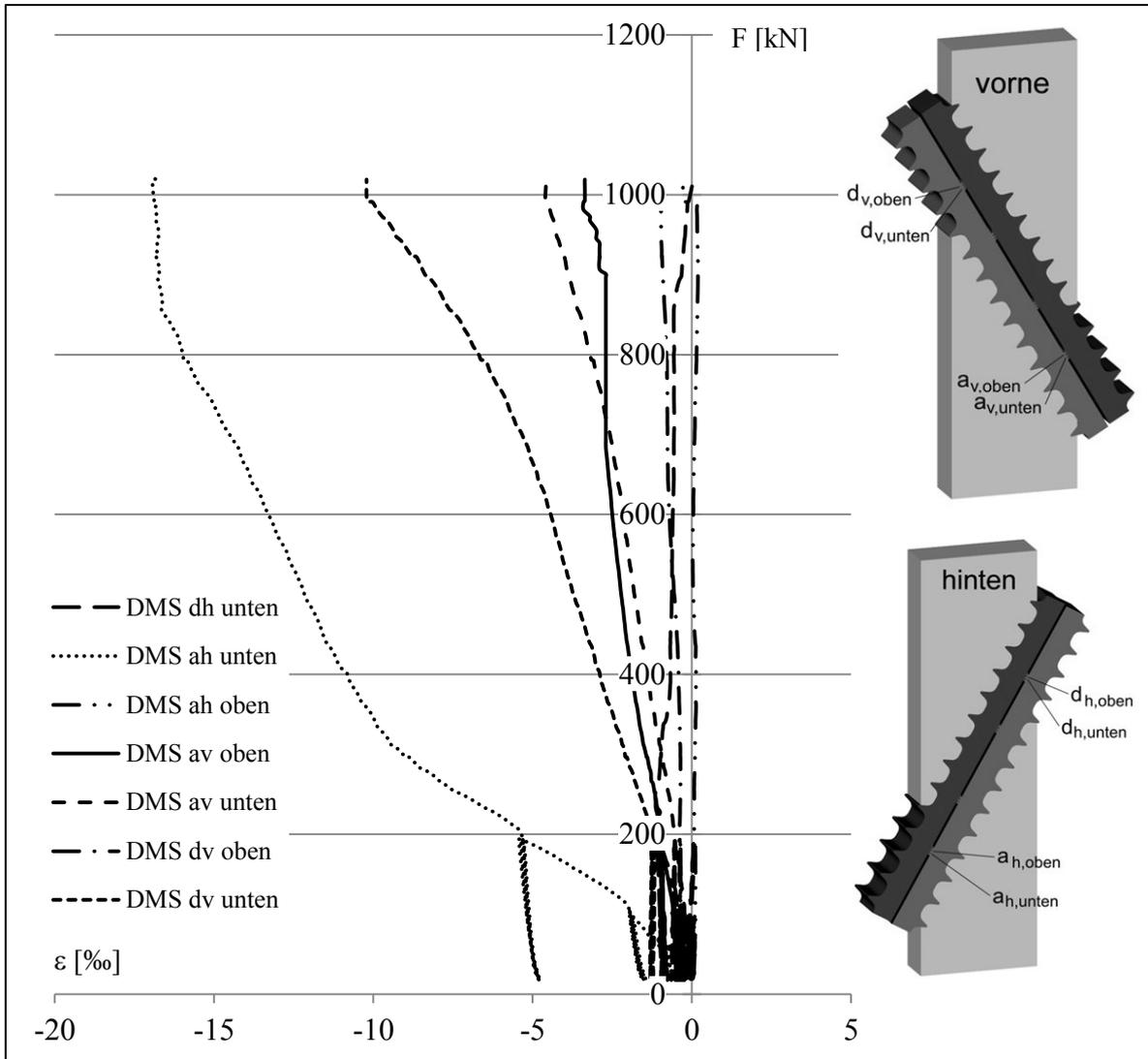


PhII - 70°-1ZL-b



PhII - 70°-1ZL-b

Arbeitslinien der Dehnmeßstreifen (DMS)



Vorzeichen- regelung	F	ε
Negativ	Zug	Dehnung
Positiv	Druck	Stauchung

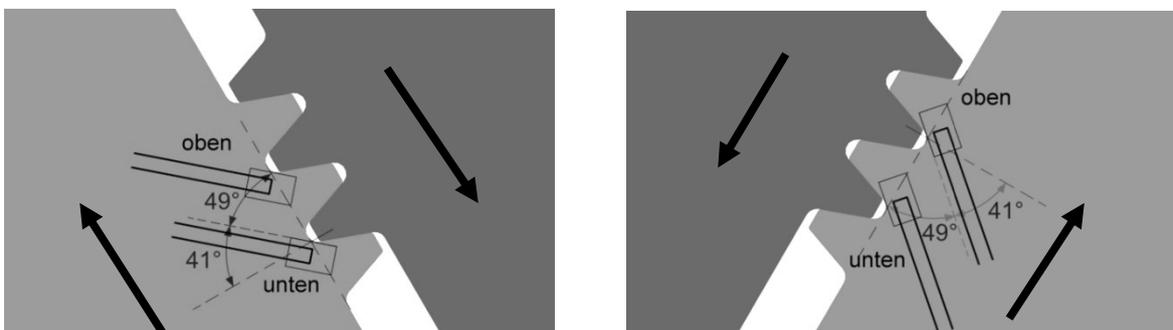
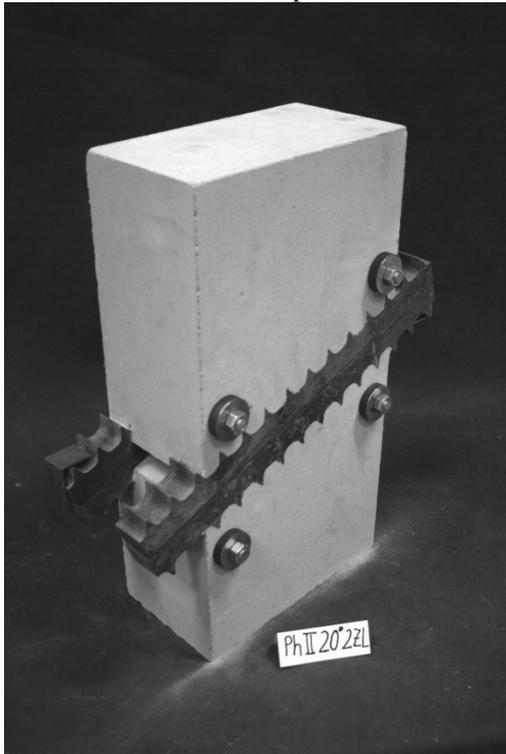


Abb.C2.5: Links: Lage der DMS vorne; rechts: Lage der DMS hinten

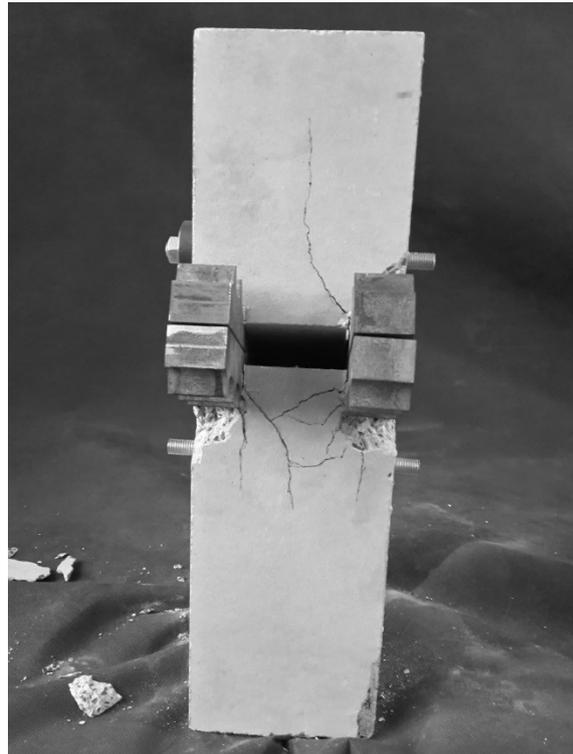
Bezeichnung		PhII - 70°-2ZL		
Beschreibung		2 Zahnleistenpaare, 20° Betonkörper mit zwei unter 20° geneigten Zahnleistenpaaren		
Herstelldatum	19.10.2016	Betonalter	32d	
Prüfdatum	21.11.2016	Lagerung	an der Luft	
Zylinderfestigkeit	121,35 [N/mm ²]			
Prüfmaschine	Lastrahmen Bauform 2031 (Toni Technik GmbH) 3,0 MN			
a x b	[mm]	140,93 x 259,50		
A	[cm ²]	365,71		
h	[mm]	501		
Wegaufnehmer	2x vertikal 1x axial			
Versagensart	Leichte Rissbildung aus Querkzug. Abplatzungen an den äußeren betonseitigen großmassstäblichen Stahlzähnen. Abfallende Last zum Ende hin durch Fließen der Gewindestangen.			
Bruchlast	[kN]	1577,08		
Belastungsgeschwindigkeit	0,6 mm/min = 0,01 mm/sek			
Belastungsprotokoll	s. Laststufen-Diagramm für 2 Zahnleistenpaare im Kap. 4			

PhII - 70°-2ZL

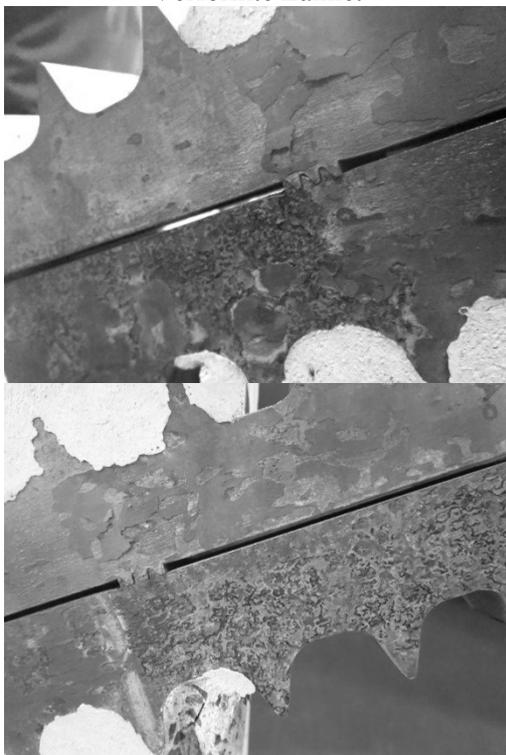
Probekörper



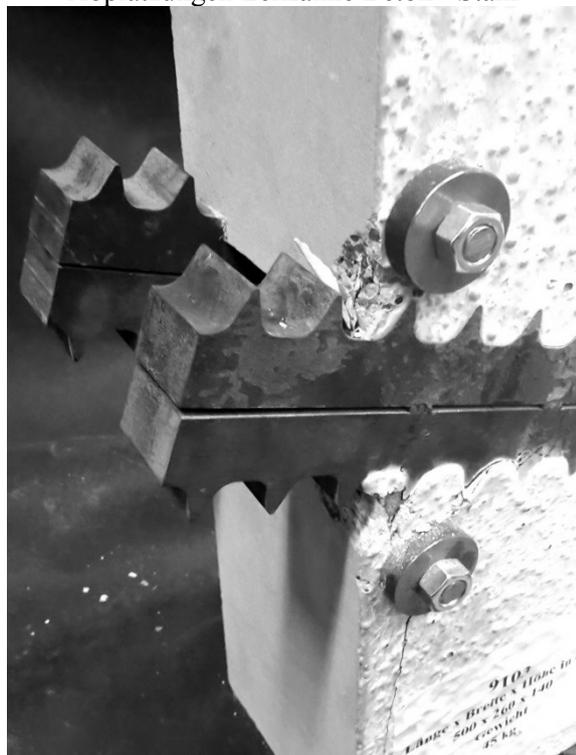
Bruchbild



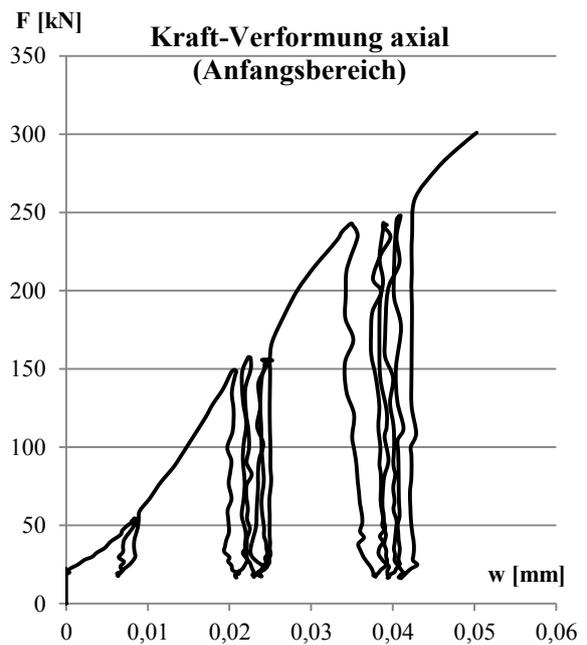
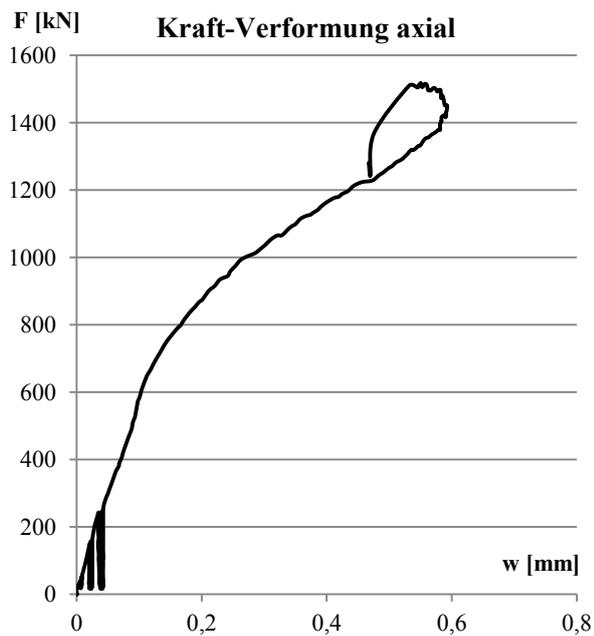
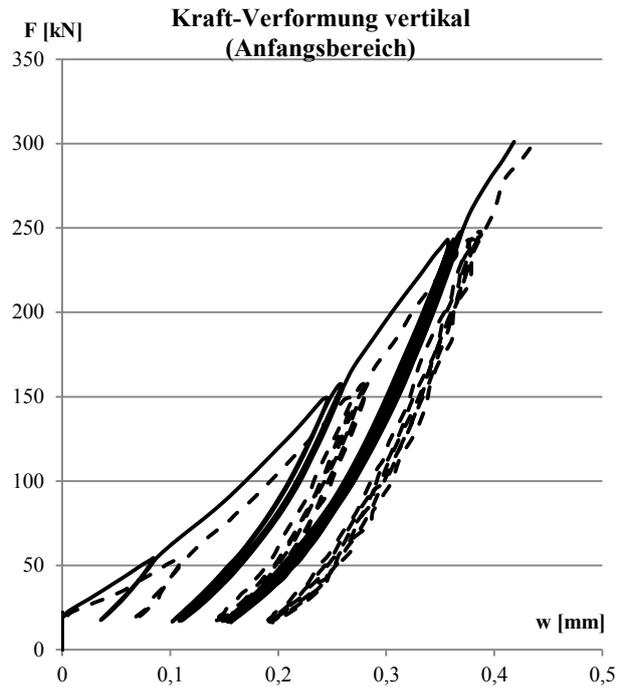
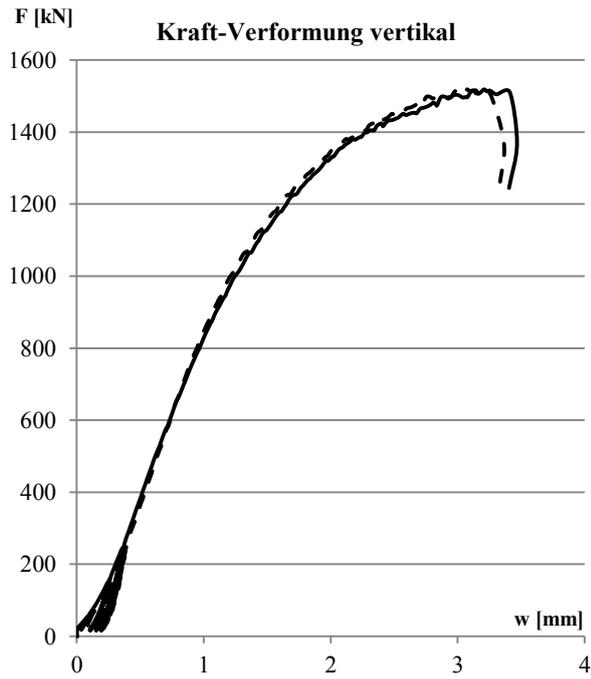
Verformte Zähne:



Abplatzungen Eckzähne Beton - Stahl



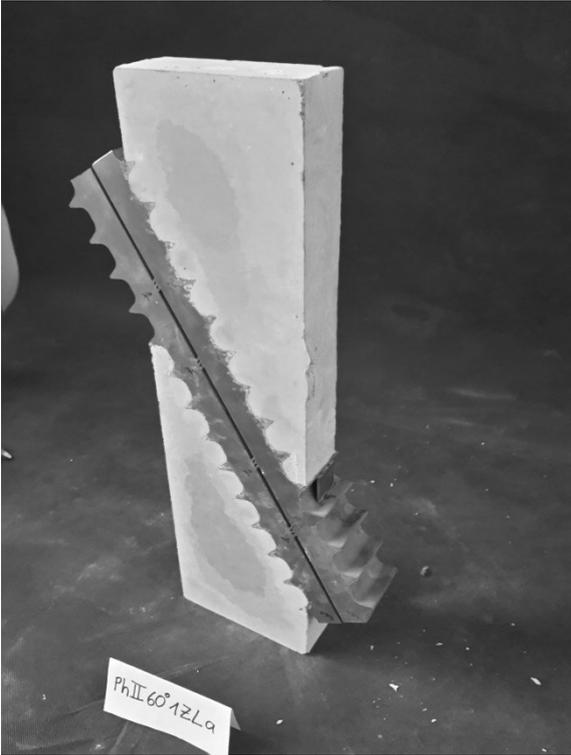
PhII - 70°-2ZL



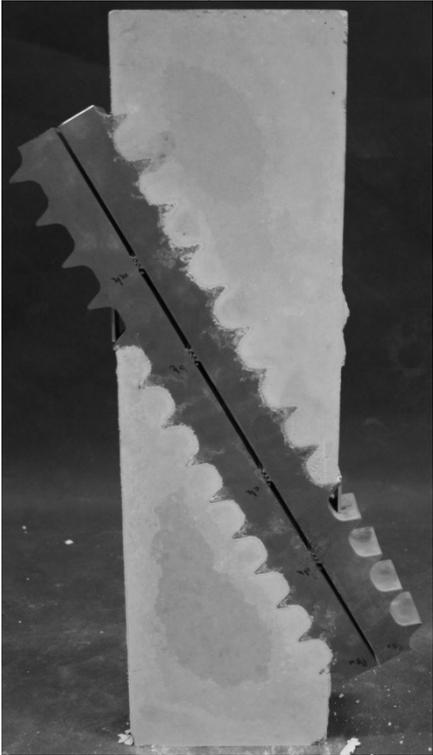
Bezeichnung		PhII - 30°-1ZL-a	
Beschreibung		1 Zahnleistenpaar, 60° Betonkörper mit einem unter 60° geneigten Zahnleistenpaar	
Herstelldatum	19.10.2016	Betonalter	33d
Prüfdatum	22.11.2016	Lagerung	an der Luft
Zylinderfestigkeit	121,35 [N/mm ²]		
Prüfmaschine	Lastrahmen Bauform 2031 (Toni Technik GmbH) 3,0 MN		
a x b [mm]	140,33 x 50,18		
A [cm ²]	70,42		
h [mm]	499		
Wegaufnehmer	2x horizontal 1x vertikal 1x axial		
Versagensart	Abplatzungen der Ecken an der Unterkante ab 200 kN. Untere Zähne erreichen Fließgrenze bis keine weitere Last mehr aufgebracht werden kann. Dann verformen sich die oberen. Der Versuch wird manuell beendet. Durch eine leichte Schiefstellung des Probekörpers werden die Zähne nicht gleichmäßig über die gesamte Breite beansprucht. Die Zähne sind häufig stark verbogen und komplett abgeschert.		
Bruchlast [kN]	383,84		
Belastungsgeschwindigkeit	0,6 mm/min = 0,01 mm/sek		
Belastungsprotokoll	s. Laststufen für 1 Zahnleistenpaar im Kap. 4		

PhII - 30°-1ZL-a

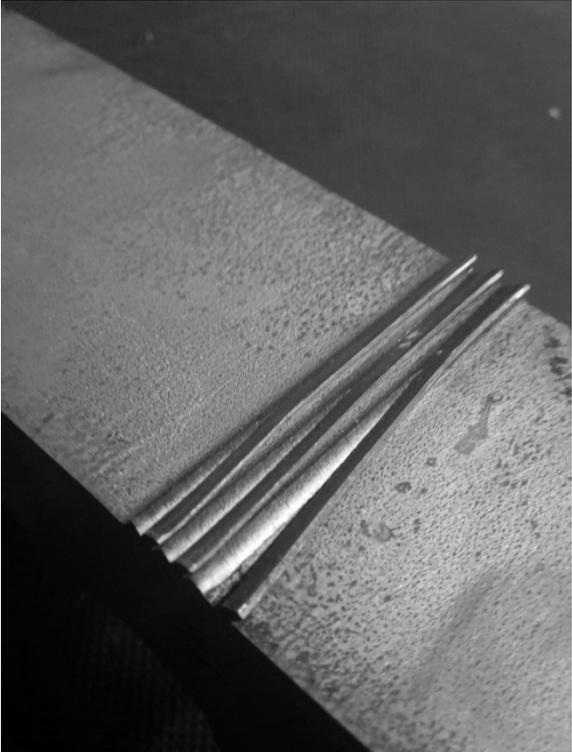
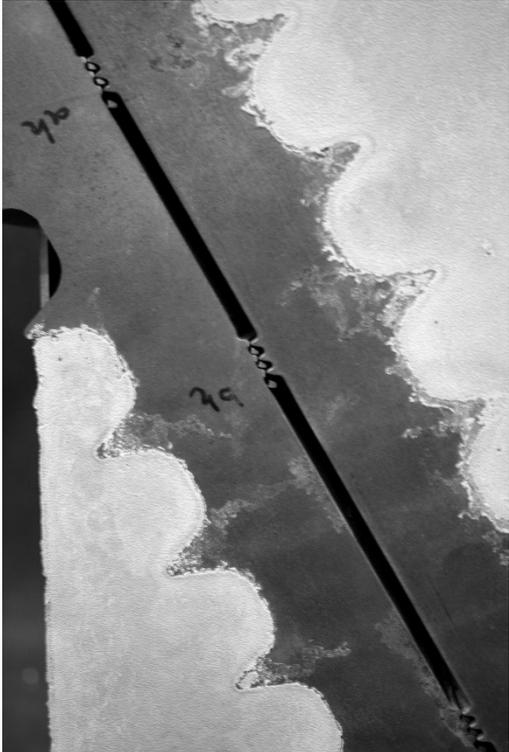
Probekörper



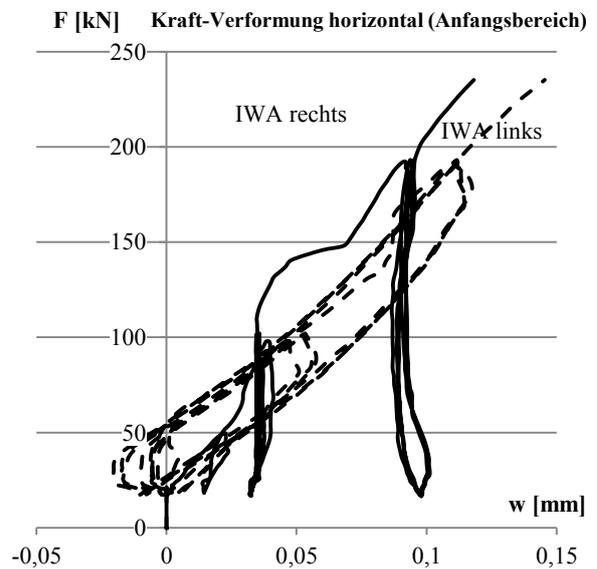
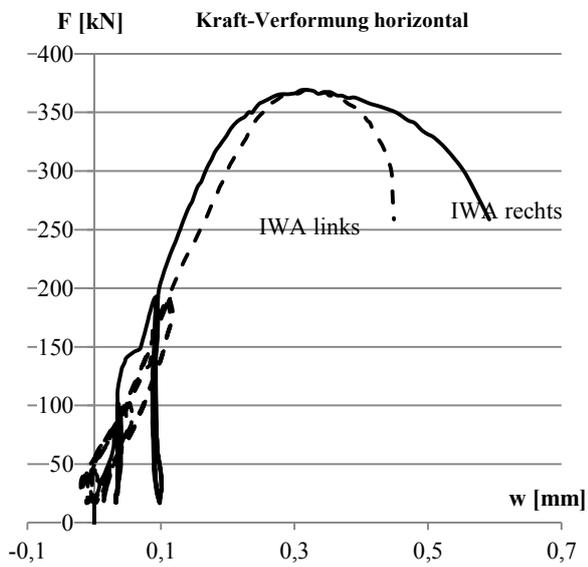
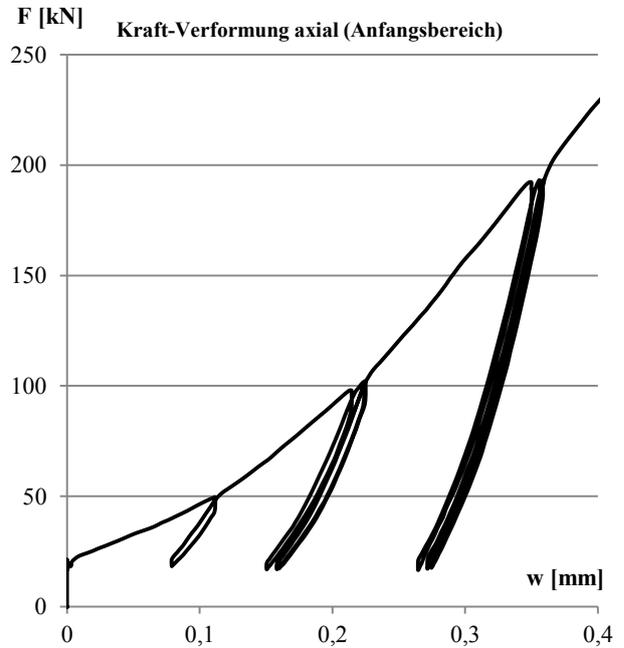
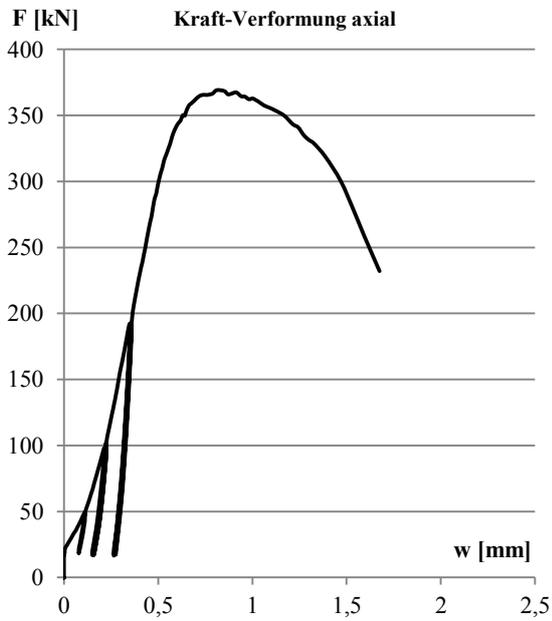
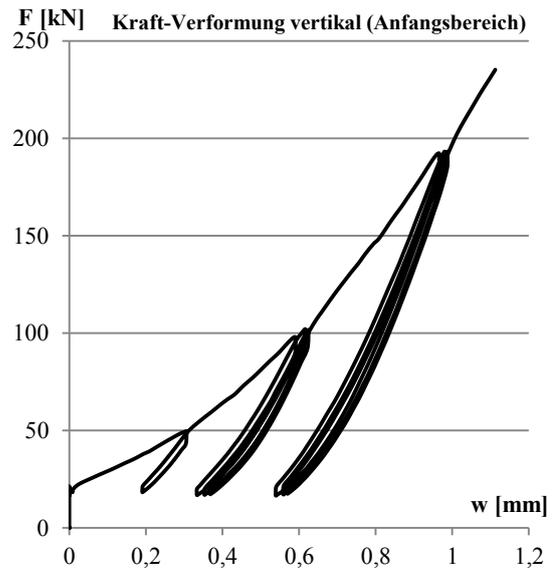
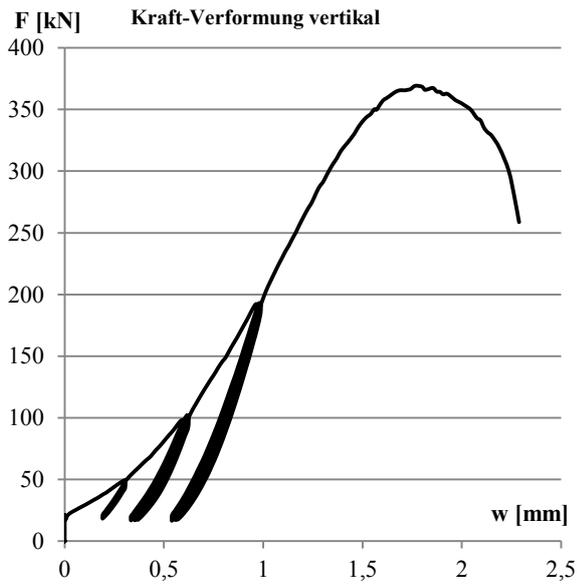
Versagensbild



Verformte Zähne:



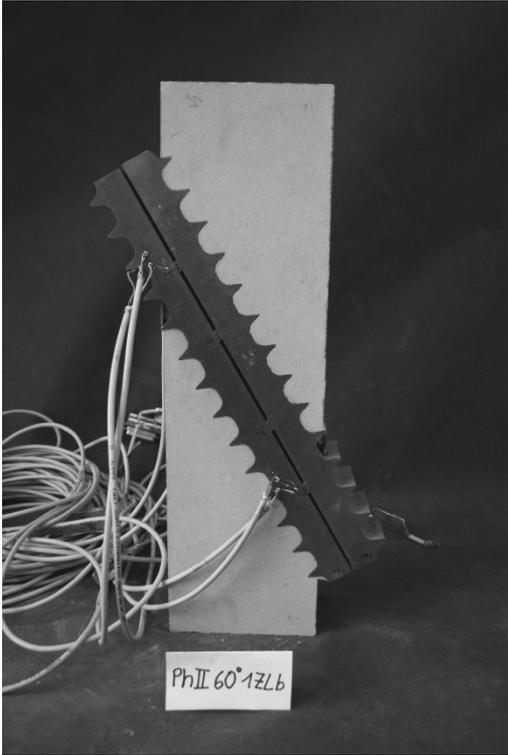
PhII - 30°-1ZL-a



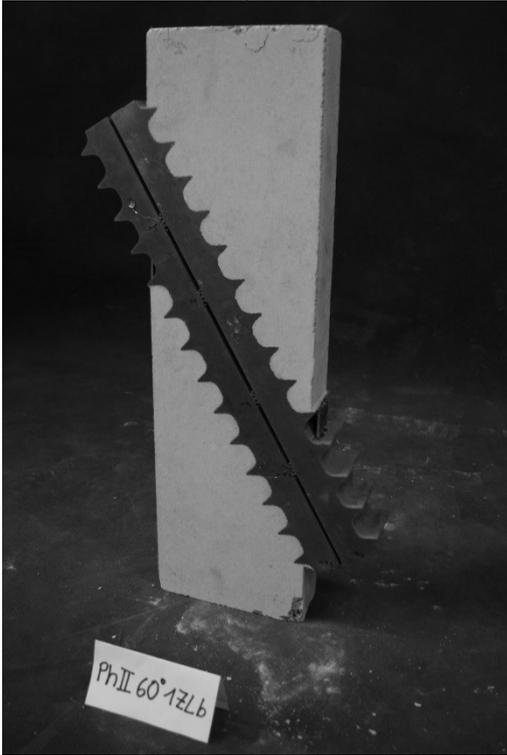
Bezeichnung		PhII - 30°-1ZL-b	
Beschreibung		1 Zahnleistenpaar, 60° Betonkörper mit einem unter 60° geneigten Zahnleistenpaar mit Dehnungsmessstreifen	
Herstelldatum	19.10.2016	Betonalter	34d
Prüfdatum	23.11.2016	Lagerung	an der Luft
Zylinderfestigkeit	121,35 [N/mm ²]		
Prüfmaschine		Lastrahmen Bauform 2031 (Toni Technik GmbH) 3,0 MN	
a x b	[mm]	140,78 x 50,08	
A	[cm ²]	70,50	
h	[mm]	505	
Wegaufnehmer	2x horizontal 1x vertikal 1x axial		
Versagensart	Leichte Abplatzungen an der Unterkante durch Schiefstellung. Untere Zähne erreichen Fließgrenze bis keine weitere Last mehr aufgebracht werden kann. Dann verformen sich die oberen Zähne ebenfalls. Durch die Schiefstellung des Probekörpers werden die Zähne nicht gleichmäßig über die gesamte Breite beansprucht. Die Zähne sind auf einer Hälfte stark verbogen und komplett abgeschert.		
Bruchlast	[kN]	373,20	
Belastungsgeschwindigkeit	0,6 mm/min = 0,01 mm/sek		
Belastungsprotokoll	s. Laststufen für 1 Zahnleistenpaar im Kap. 4		

PhII - 30°-1ZL-b

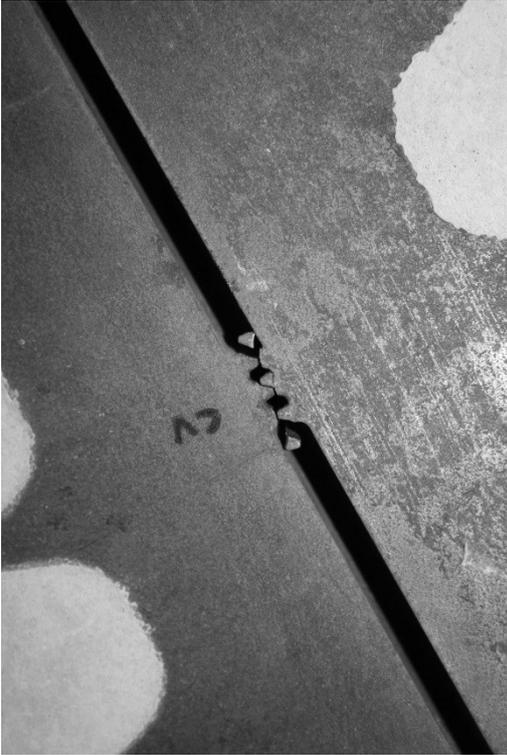
Probekörper



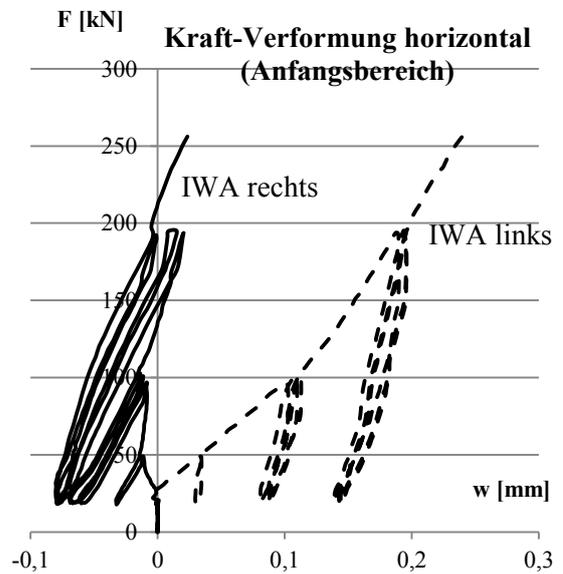
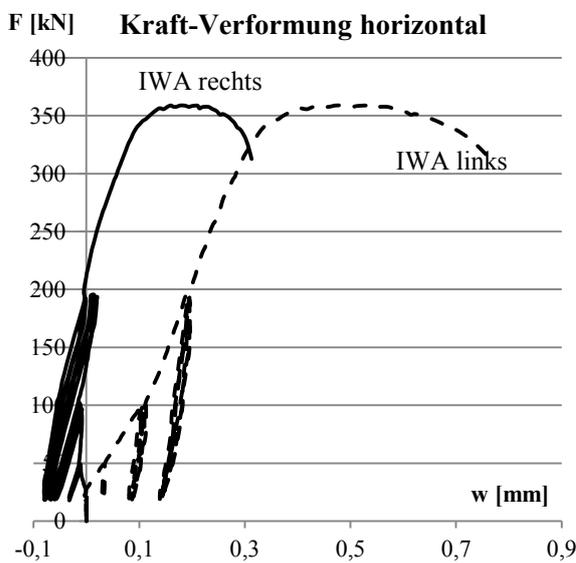
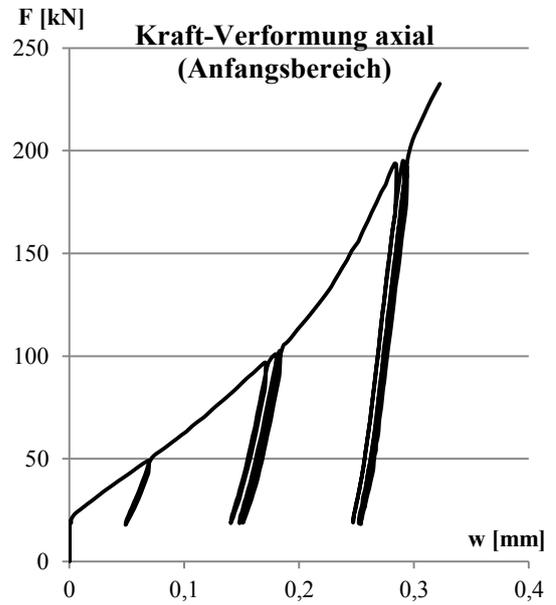
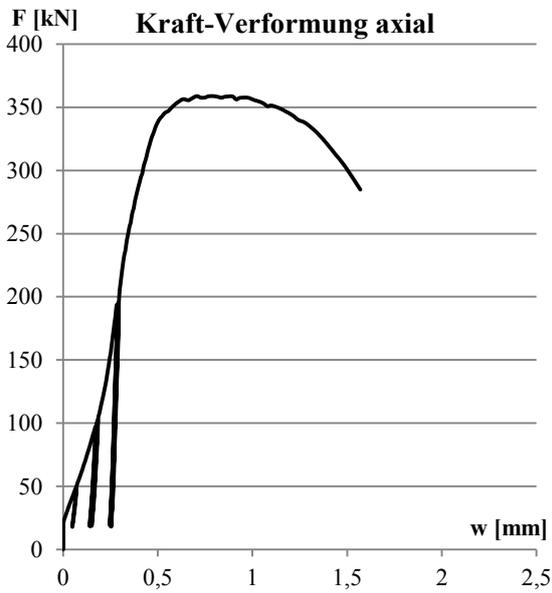
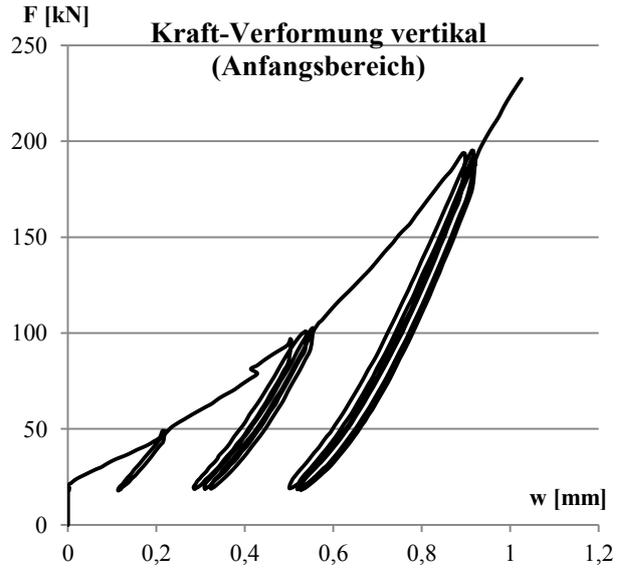
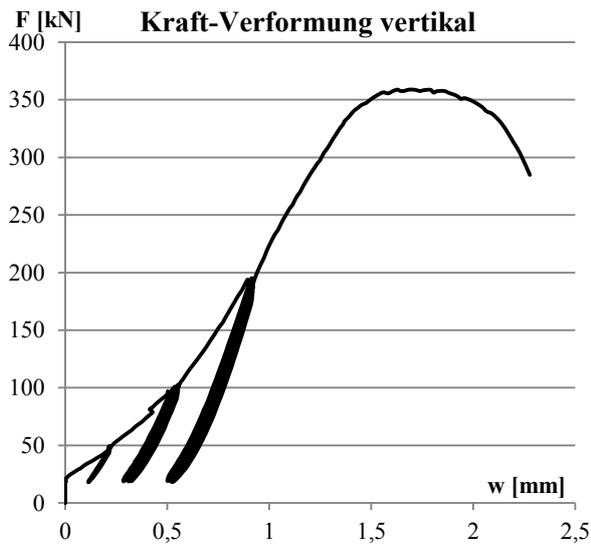
Versagensbild



Verformte Zähne:

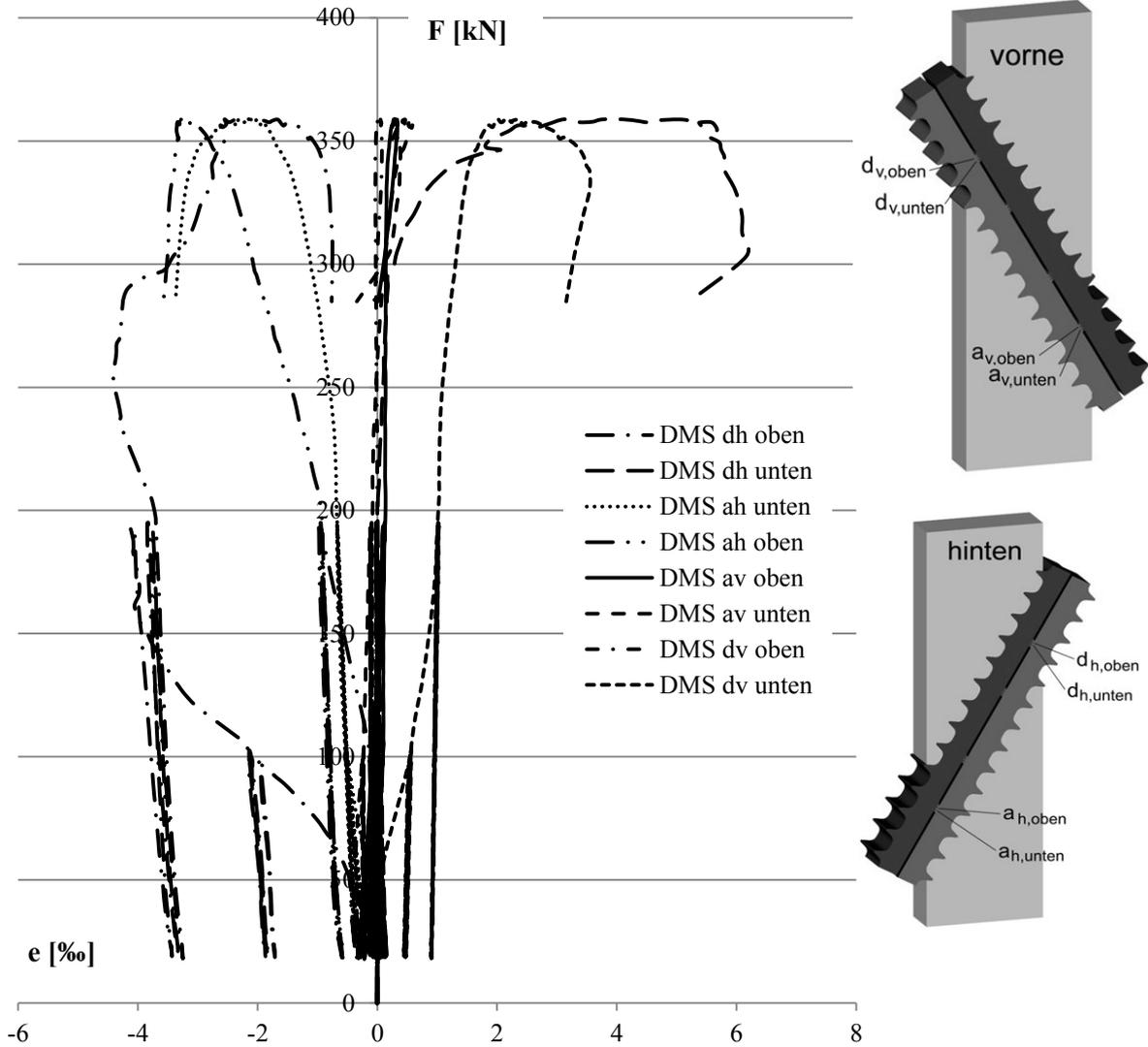


PhII - 30°-1ZL-b



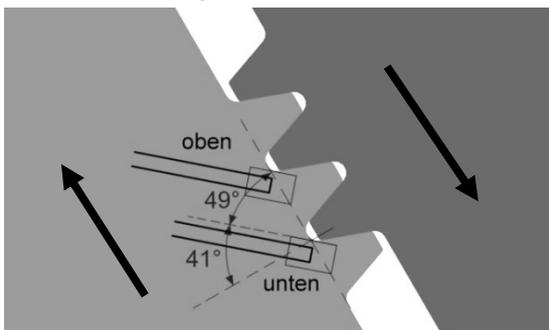
PhII - 30°-1ZL-b

Spannungs-Dehnungsdiagramm (DMS)

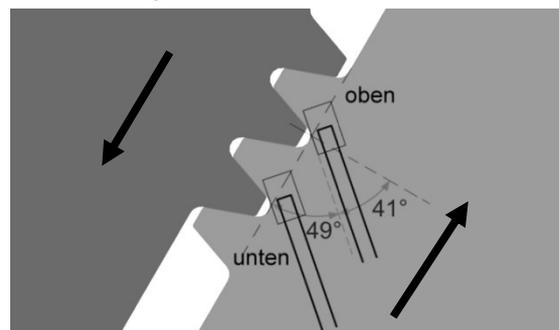


Vorzeichen- regelung	F	ϵ
Negativ	Zug	Dehnung
Positiv	Druck	Stauchung

Lage der DMS vorne



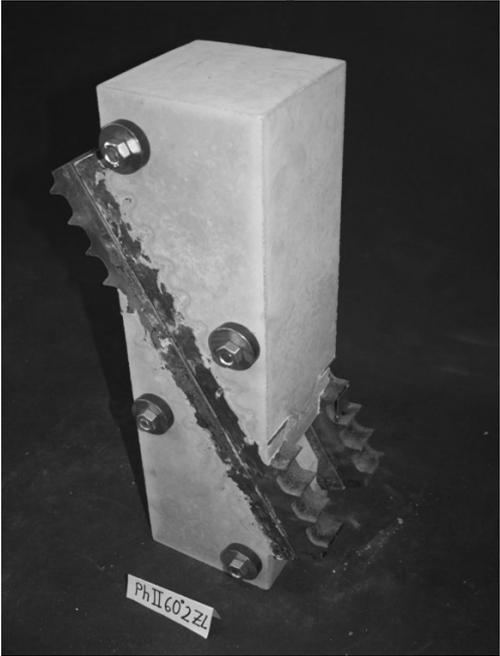
Lage der DMS hinten



Bezeichnung	PhII - 30°-2ZL		
Beschreibung	2 Zahnleistenpaare, 60° Betonkörper mit zwei unter 60° geneigten Zahnleistenpaaren		
Herstelldatum	19.10.2016	Betonalter	32d
Prüfdatum	21.11.2016	Lagerung	an der Luft
Zylinderfestigkeit	121,35 [N/mm ²]		
Prüfmaschine	Lastrahmen Bauform 2031 (Toni Technik GmbH) 3,0 MN		
a x b [mm]	139,71 x 140,24		
A [cm ²]	195,93		
h [mm]	501		
Wegaufnehmer	2x horizontal 1x vertikal 1x axial		
Versagensart	Die Zahnleisten werden fälschlicherweise bei der Betonage mit einem Versatz von einem Zahn zueinander eingebracht. Dadurch sitzt eine Seite richtig ineinander und die gegenüberliegende Seite hat einen unbeanspruchten Zahn, wodurch die Versagenslast reduziert wird. Die beanspruchten Zähne verformen sich gleichmäßig, bis der obere Körper abrutscht. Dabei wird der Verbund zwischen Zahnleiste und Beton auf einer Seite vollständig gelöst.		
Bruchlast [kN]	398,64		
Belastungsgeschwindigkeit	0,6 mm/min = 0,01 mm/sek		
Belastungsprotokoll	s. Laststufen für 2 Zahnleistenpaare im Kap. 4		

PhII - 30°-2ZL

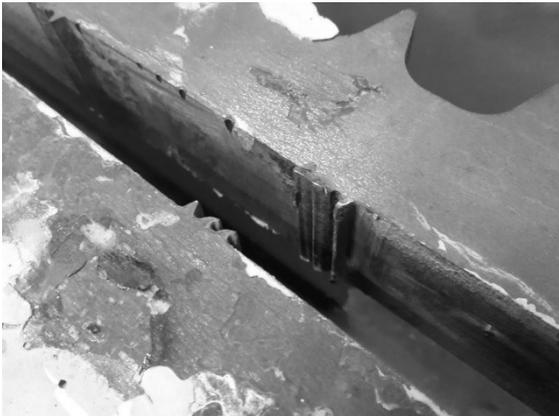
Probekörper



Versagensbild



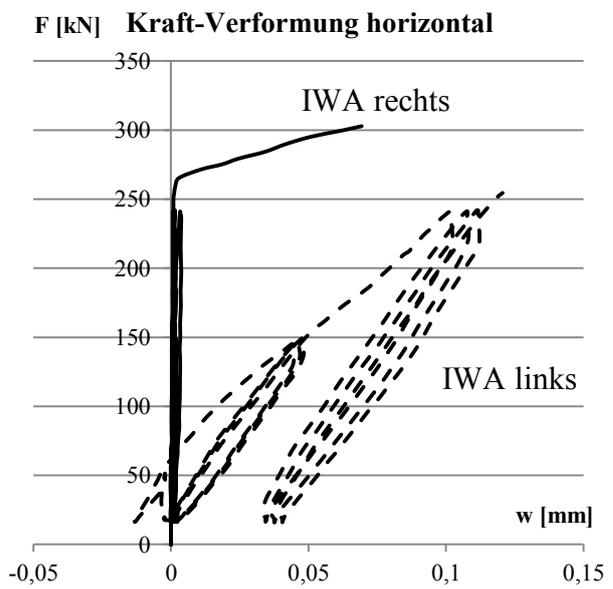
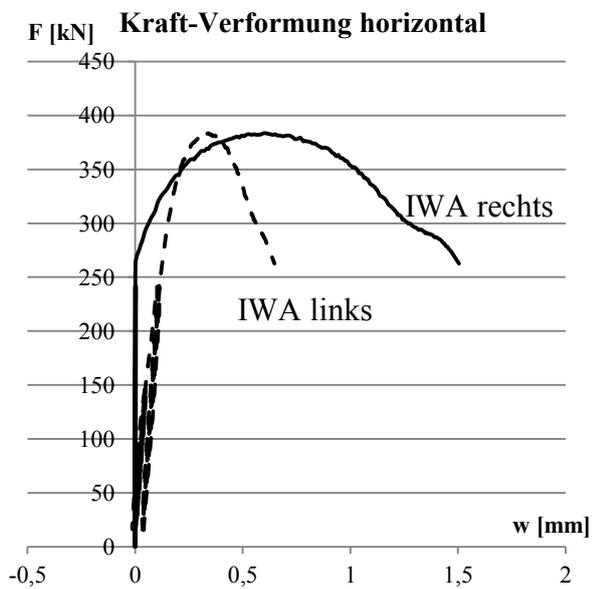
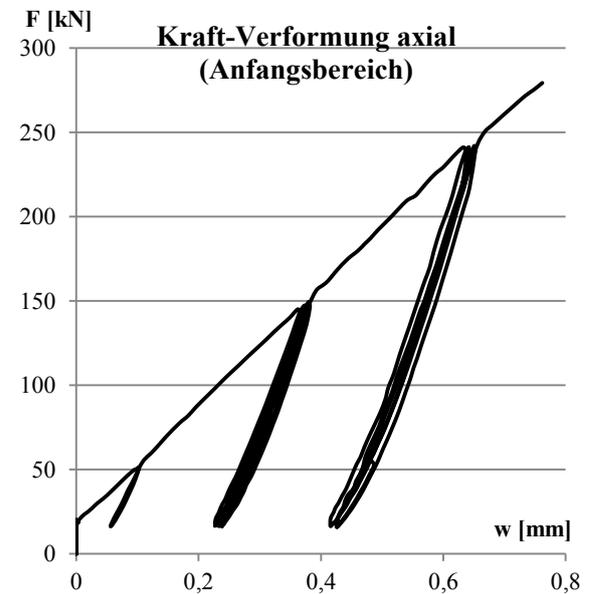
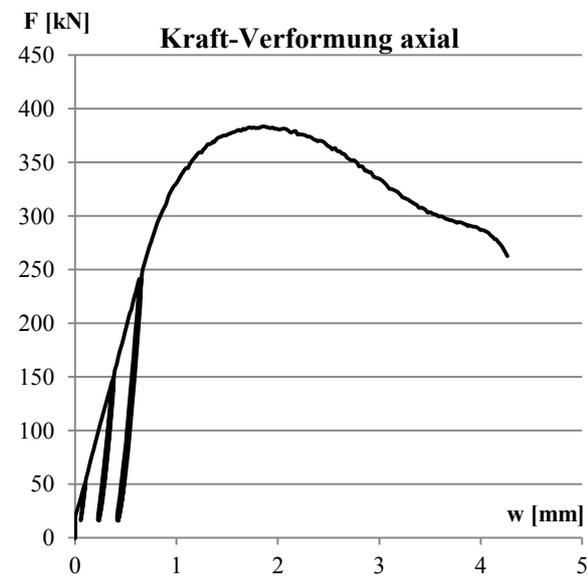
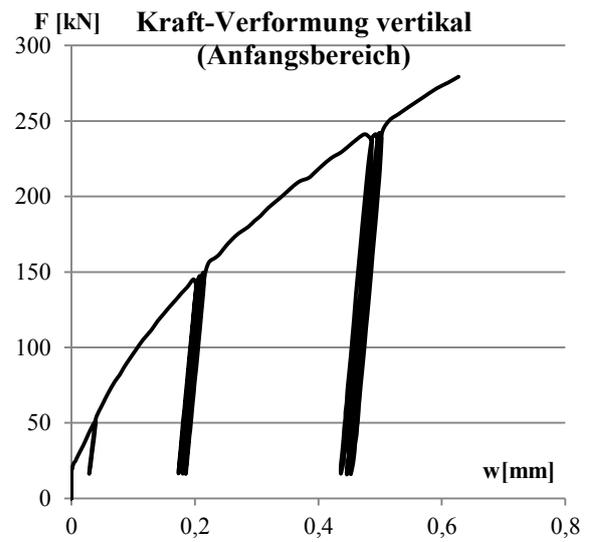
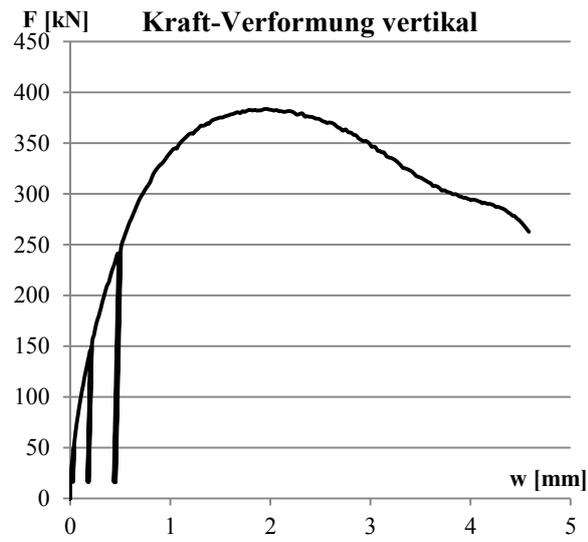
Verformte Zähne Vorderseite



Verformte Zähne Rückseite



PhII - 30°-2ZL



Anhang C3: Dokumentation Versuche Phase III

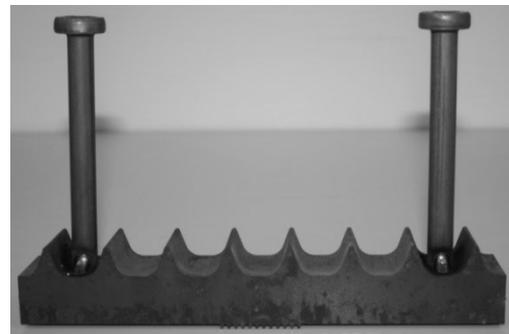


Abb.C3.1: Versuchsaufbau Konsole, oben 68cm Konsolhöhe, unten 33cm Konsolhöhe

Tab.C3.1: Versuchsprogramm Phase III – Stahl/Stahl

Versuchs-nr.	Zahn-geometrie	Anordnung der Zähne	n Zahn S/B	n Zahn S/S	Kraft-neigung	Abmessungen Kon.			Material Stahl	Material Beton
						b [cm]	t [cm]	h [cm]		
III/V1	GT5	Gruppen	12	36	25,5	30,5	40	68	S 1	Ult
III/V2	GT5	Gruppen	12	36	25,6	30,5	40	68	S 1	Ult
III/V3	GT5	Gruppen	12	36	32,7	30,5	40	68	S 1	Ult
III/V4	GT5	Gruppen	8	24	45,6	30,5	40	33	S 2	Bet
III/V5	GT5	Konzentriert	8	24	45,1	30,5	40	33	S 2	Bet
III/V6	GT3	Konzentriert	8	10	43,9	30,5	40	33	S 2	Bet

Ult = Ultralith S1 = Stahl S235 Charge 1
 Bet = Betec S2 = Stahl S235 Charge 2

Dokumentation der verformten Zähne der Versuche III/V1-3 und der Versuchsergebnisse

Die ersten drei Konsolversuche III/V1 bis III/V3 erreichen nicht die erwarteten Versuchslasten. Das wird damit begründet, dass die Zähne beim Zusammenbau nicht exakt ineinander greifen und bei III/V2 und III/V3 durch die geringere Vorspannung der Gewindestangen schneller ins Gleiten kommen. Um abschätzen zu können welche Zähne getragen haben, werden die Schadensbilder untersucht und die einzelnen Zahngruppen mit dem Meßschieber aufgemessen (Abb. C3.2). Die Konsole wird auf die Stütze geklappt, so dass jeweils die Zahnleisten A-A bzw. B-B aufeinanderliegen. Zu den einzelnen Zahnreihen ist jeweils die aktivierte Länge, die nach dem Versuch Abnutzungsspuren aufweist angegeben. Weiterhin ist relativ die aktivierte Zahnhöhe sowie die Flächenverteilung (1,0 für rechteckig; 0,5 für dreieckig) angegeben. Daraus ergibt sich die prozentual aktivierte Fläche je Zahnreihe. Am Ende der Tabelle wird die prozentual über die gesamte Zahnleiste mit 6 Zahngruppen mit jeweils 3 Zahnreihen (maximal 1800%) aktivierte Fläche angegeben (Hofmann 2017).

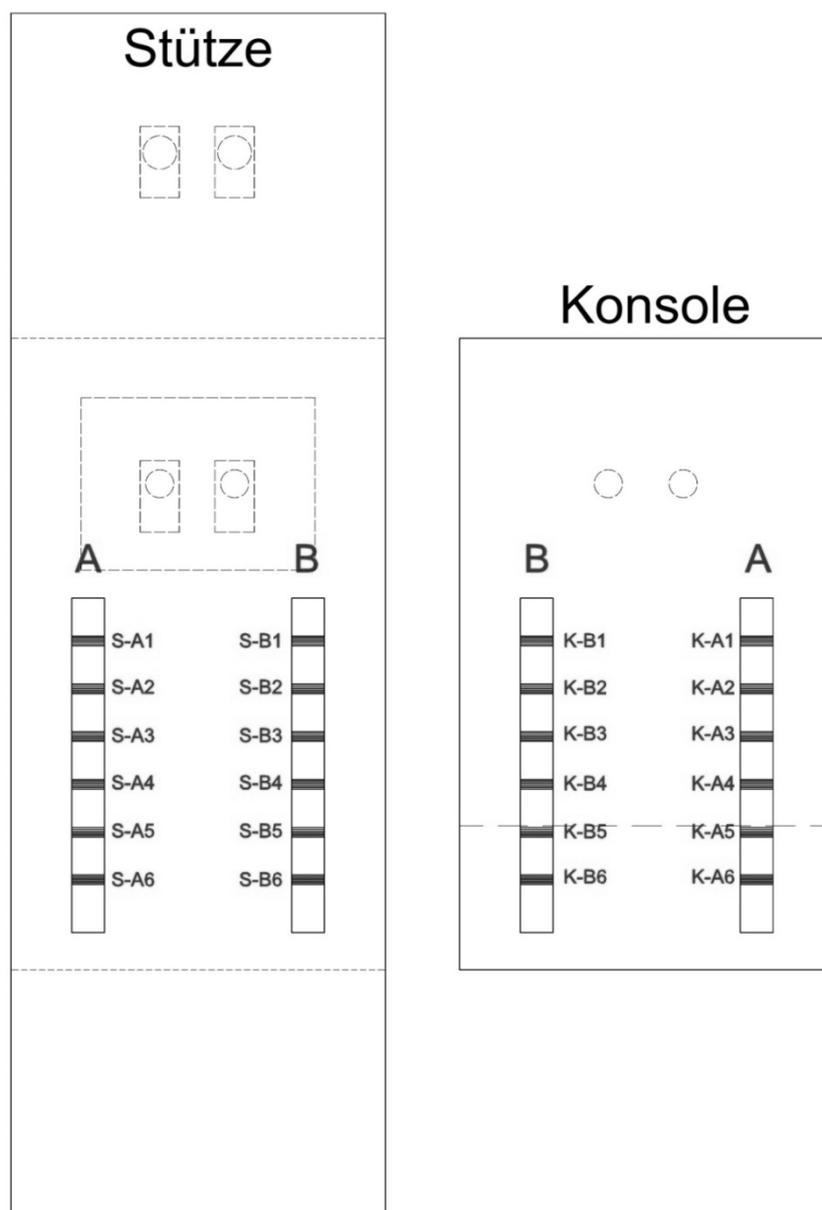
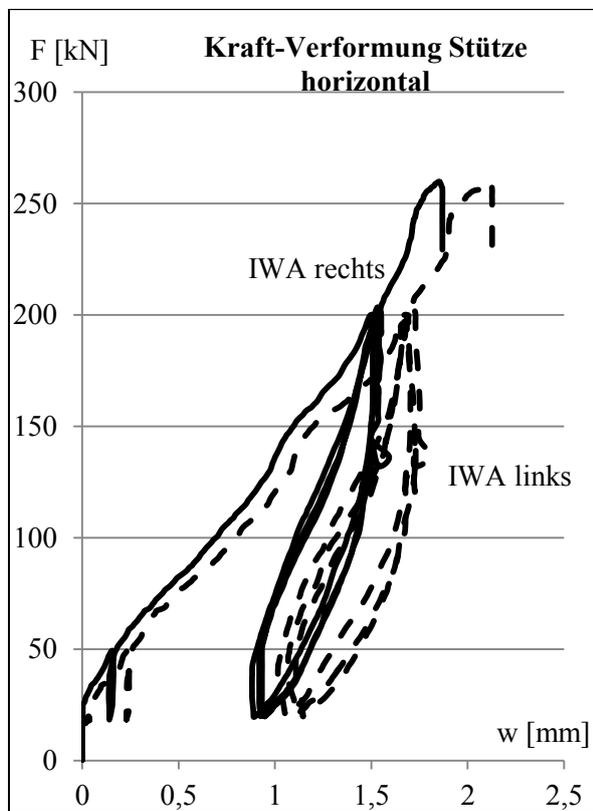
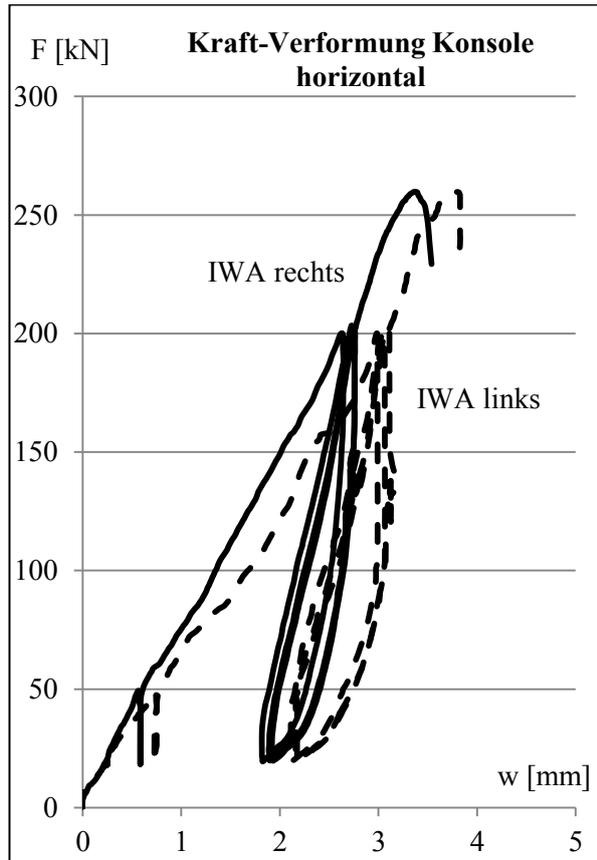
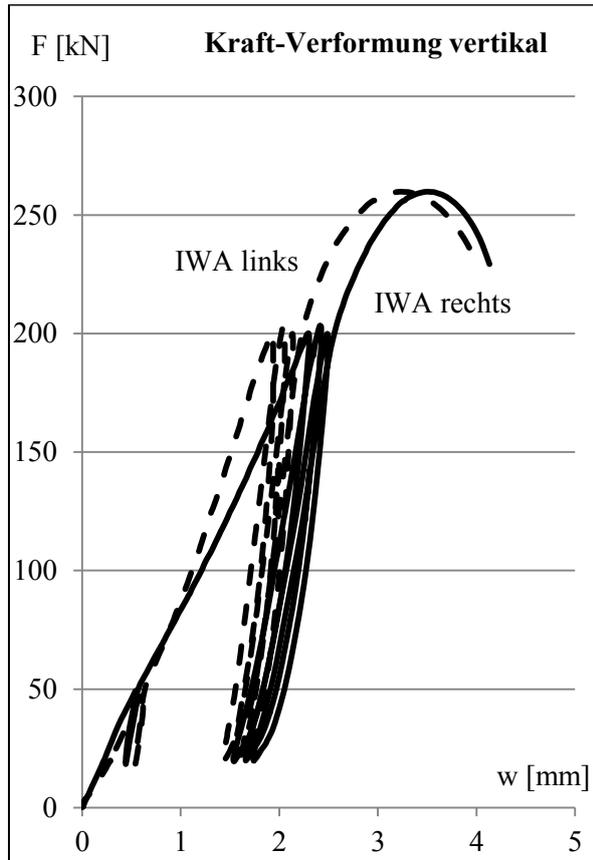


Abb.C3.2: Bezeichnung der einzelnen Zahngruppen(Hofmann 2017)

Konsolenversuch 1

Bezeichnung	Konsolenversuch 1		
Beschreibung	Konsole mit 2 Zahnleisten mit jeweils 6 x 3 Stahlzähnen (GT5) Alle Gewindestangen handfest angezogen (entspricht etwa 45 Nm je Gewindestange).		
Herstelldatum	19.+20.10.2016	Betonalter	38d
Prüfdatum	28.11.2016	Lagerung	an der Luft
Zylinderfestigkeit	121,35 [N/mm ²]		
Prüfmaschine	Prüfportal (Zwick/Roell) 2,5 MN		
Wegaufnehmer	2x horizontal an der Stütze 2x horizontal an der Konsole 2x vertikal unter der Konsole 1x vertikal im Zylinder		
Versuchs- beobachtungen	Starke Setzungen in der Lasteinleitungsstruktur. Starke Verformung der Konsole in horizontaler Richtung. Die Fuge öffnet sich und die Zähne verlieren Kontakt. Versuchslast wird noch vor der Laststufe 300 kN erreicht.		
Bruchlast	[kN]	260,4	
Reibungsanteil	[kN]	~0,0	
Belastungsgeschwindigkeit	0,6 mm/min = 0,01 mm/sek		
Belastungsprotokoll	s. Kap. 6		

Konsolenversuch 1



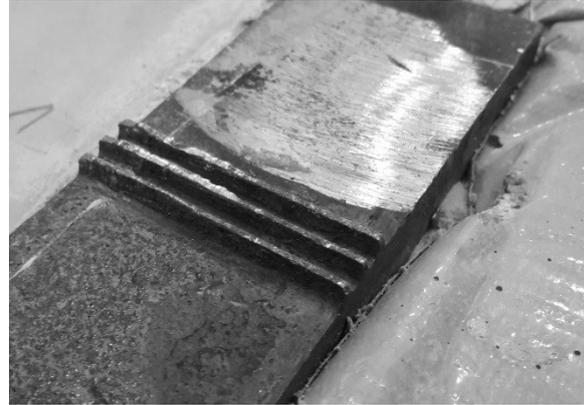
Konsolenversuch 1

Stütze

Konsole

S-A1

K-A1



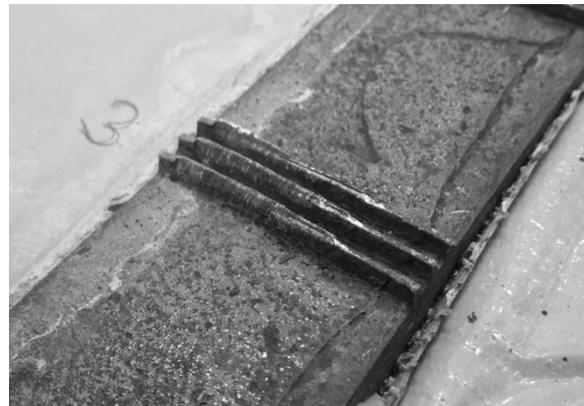
S-A2

K-A2



S-A3

K-A3



Konsolenversuch 1

Stütze

Konsole

S-A4

K-A4



S-A5

K-A5



S-A6

K-A6



Konsolenversuch 1

	Zahnreihe	aktivierte Breite	aktivierte Zahnhöhe	Flächenverteilung	aktivierte Fläche		Zahnreihe	aktivierte Breite	aktivierte Zahnhöhe	Flächenverteilung	aktivierte Fläche		
		[cm]	[-]	[-]	[%]			[cm]	[-]	[-]	[%]		
S-A1	1	1,25	1	0,5	17,9		K-A1	1	1,52	0,2	1	8,7	
	2	1,28	1	0,5	18,3			2	1,74	0,2	1	9,9	
	3	1,33	1	0,5	19			3	0	0,2	1	0	
S-A2	1	1,33	1	0,5	19		K-A2	1	1,77	0,2	1	10,1	
	2	1,75	1	0,5	25			2	1,25	0,2	1	7,1	
	3	1,58	1	0,5	22,6			3	1,61	0,2	1	9,2	
S-A3	1	1,30	1	0,5	18,6		K-A3	1	2,23	1	0,5	31,9	
	2	1,74	1	0,5	24,9			2	2,07	1	0,5	29,6	
	3	1,92	1	0,5	27,4			3	2,15	1	0,5	30,7	
S-A4	1	1,66	1	0,5	23,7		K-A4	1	2,68	1	0,5	38,3	
	2	1,72	1	0,5	24,6			2	2,62	1	0,5	37,4	
	3	1,33	1	0,5	19			3	2,65	1	0,5	37,9	
S-A5	1	1,95	1	0,5	27,9		K-A5	1	3,1	1	0,5	44,3	
	2	1,90	1	0,5	27,1			2	2,96	1	0,5	42,3	
	3	1,96	1	0,5	28			3	2,9	1	0,5	41,4	
S-A6	1	2,07	1	0,5	29,6		K-A6	1	3,16	1	0,5	45,1	
	2	2,28	1	0,5	32,6			2	3,07	1	0,5	43,9	
	3	2,18	1	0,5	31,1			3	3,09	1	0,5	44,1	
					Σ 436,3 %							Σ 511,9 %	
					von maximal 1800%	24,2 %						von maximal 1800%	28,4 %

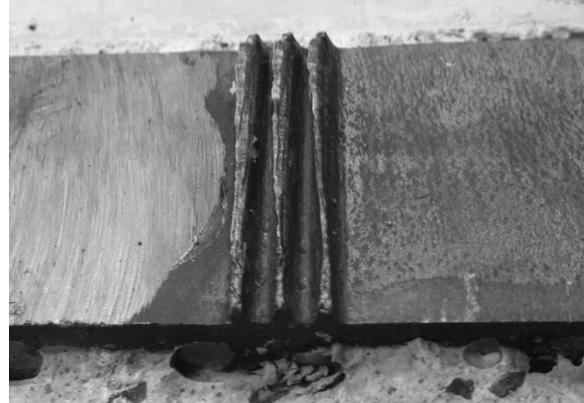
Konsolenversuch 1

Stütze

Konsole

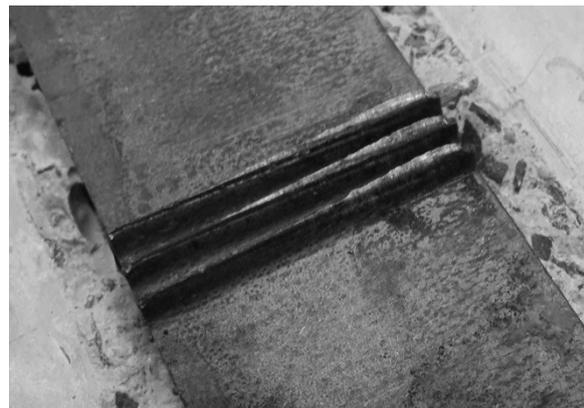
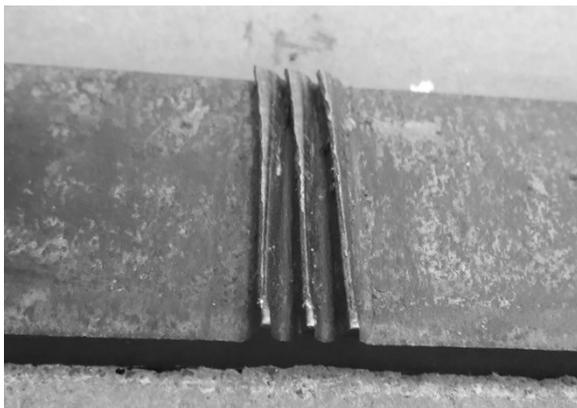
S-B1

K-B1



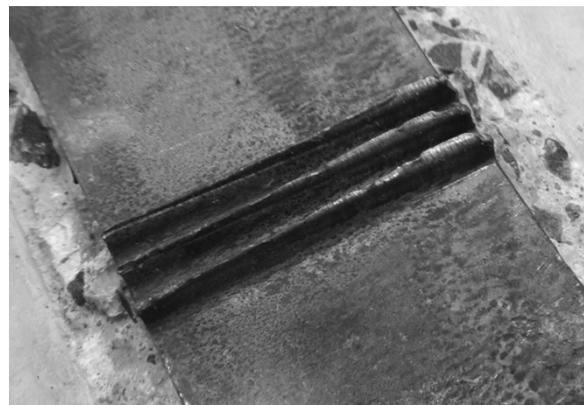
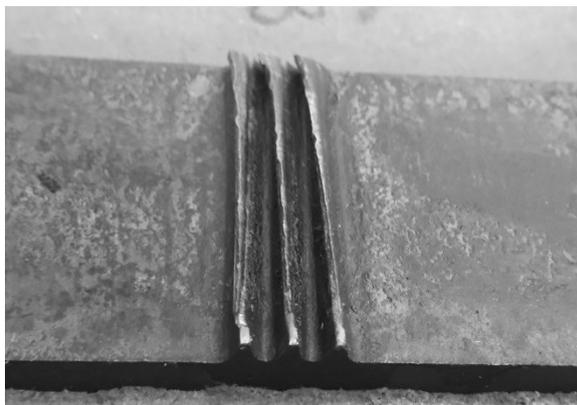
S-B2

K-B2



S-B3

K-B3



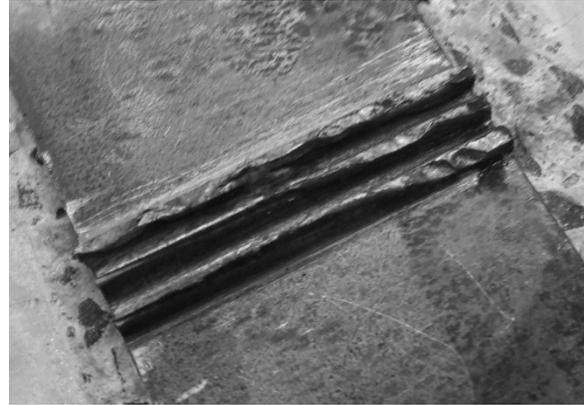
Konsolenversuch 1

Stütze

Konsole

S-B4

K-B4



S-B5

K-B5



S-B6

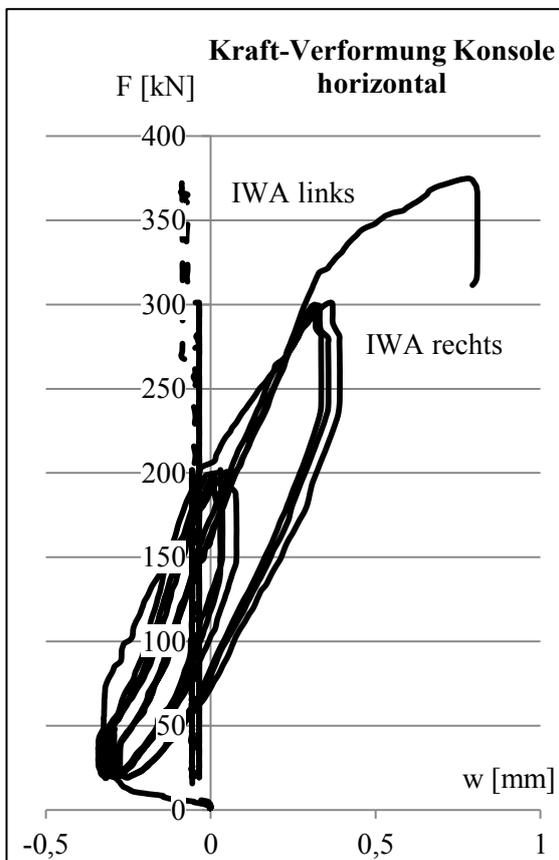
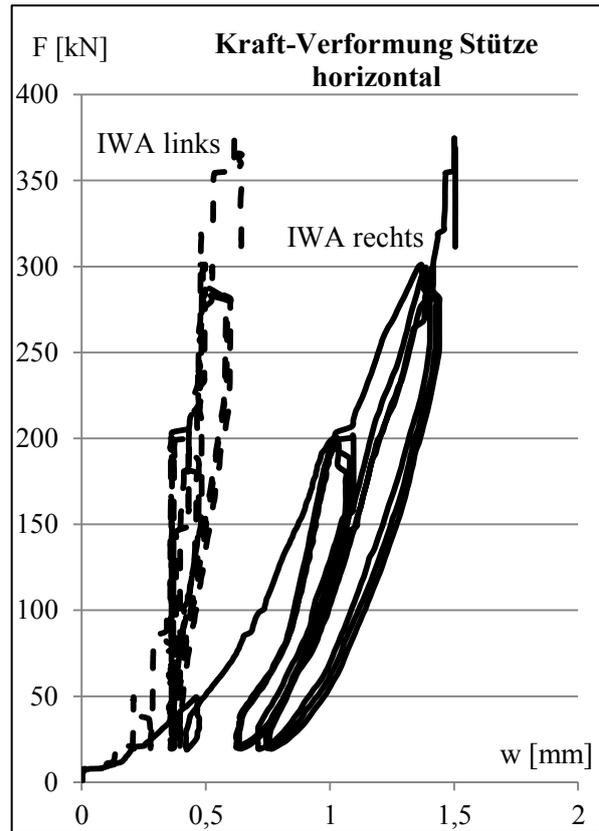
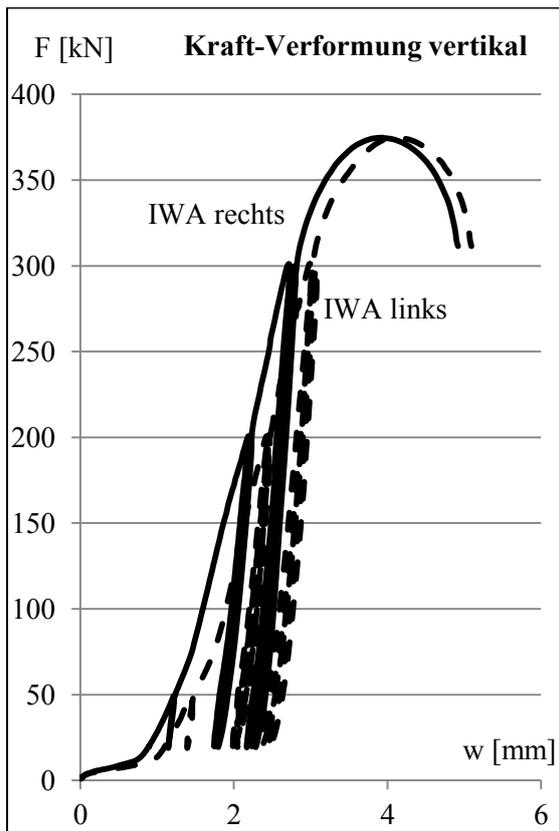
K-B6



Konsolenversuch 2

Bezeichnung	Konsolenversuch 2		
Beschreibung	Konsole mit 2 Zahnleisten mit jeweils 6 x 3 Stahlzähnen (GT5) Alle Gewindestangen mit 300 Nm vorgespannt		
Herstelldatum	19.+20.10.2016	Betonalter	39d
Prüfdatum	29.11.2016	Lagerung	an der Luft
Zylinderfestigkeit	121,35 [N/mm ²]		
Prüfmaschine	Prüfportal (Zwick/Roell) 2,5 MN		
Wegaufnehmer	2x vertikal unter der Konsole 1x vertikal im Zylinder		
Versuchs- beobachtungen	Konsole leicht schief eingebaut. Horizontale Wegaufnehmer liefern keine brauchbaren Ergebnisse. Stütze und Konsole verschieben sich zusammen als Starrkörper.		
Bruchlast	[kN]	375,4	
Reibungsanteil	[kN]	~ 0,0	
Belastungsgeschwindigkeit	0,6 mm/min = 0,01 mm/sek		
Belastungsprotokoll	s. Kap. 6		

Konsolenversuch 2



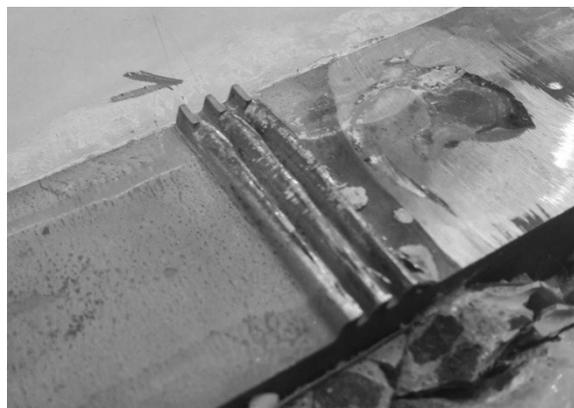
Konsolenversuch 2

Stütze

Konsole

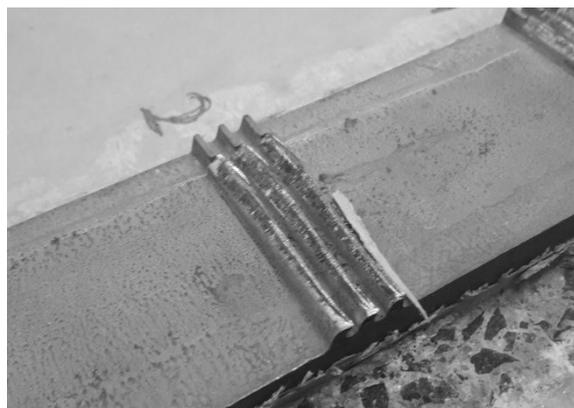
S-A1

K-A1



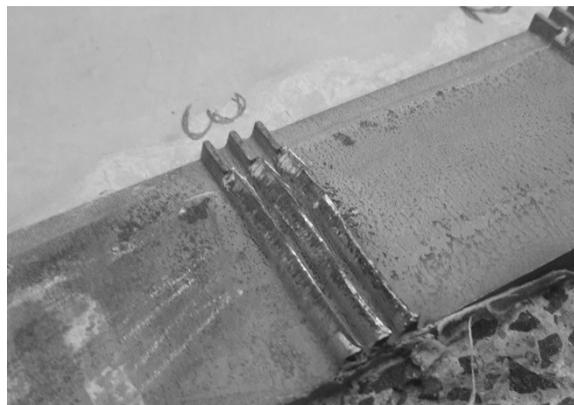
S-A2

K-A2



S-A3

K-A3



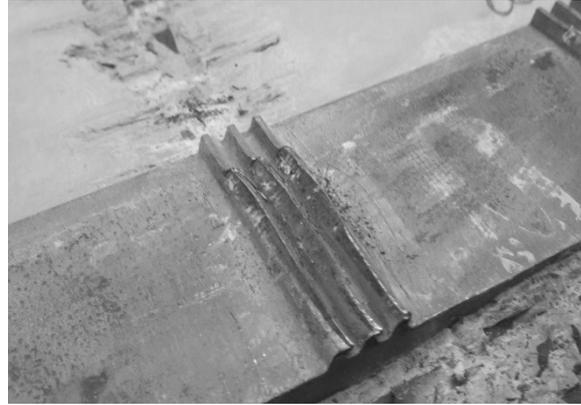
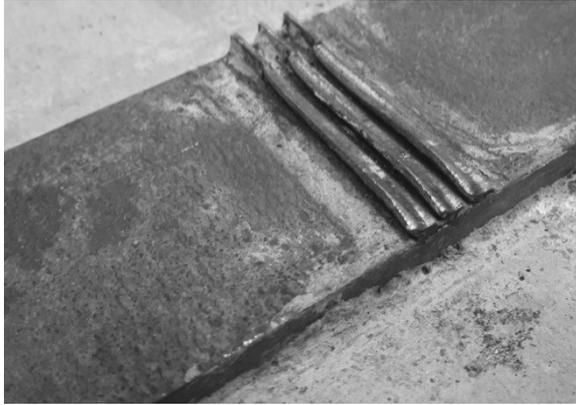
Konsolenversuch 2

Stütze

Konsole

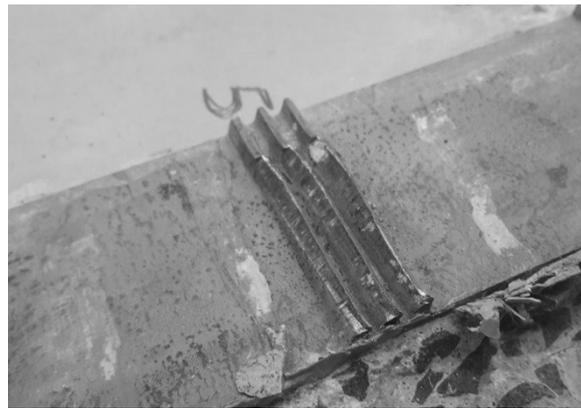
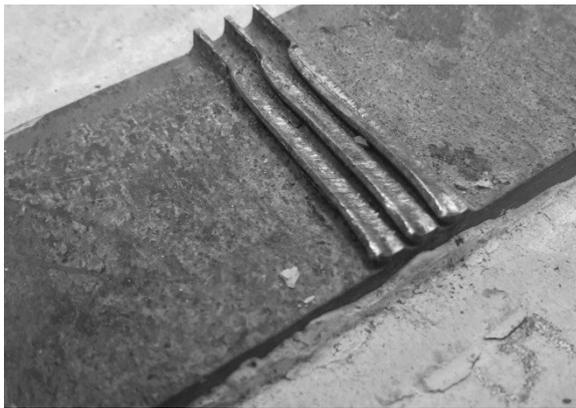
S-A4

K-A4



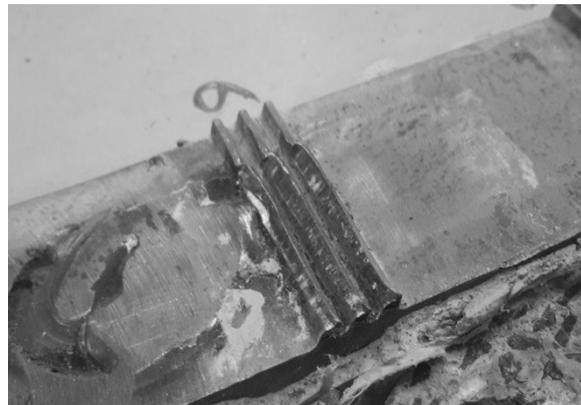
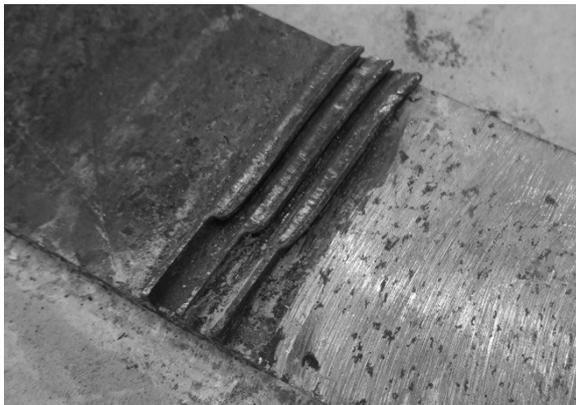
S-A5

K-A5



S-A6

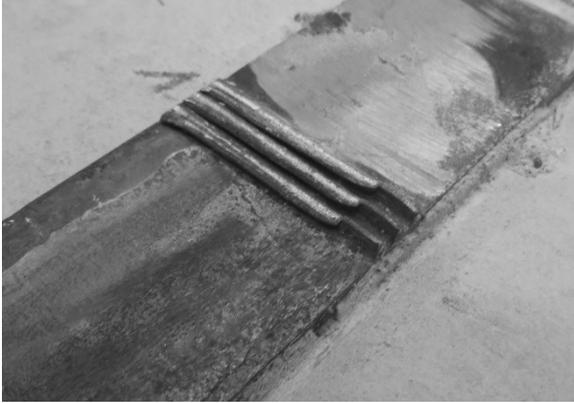
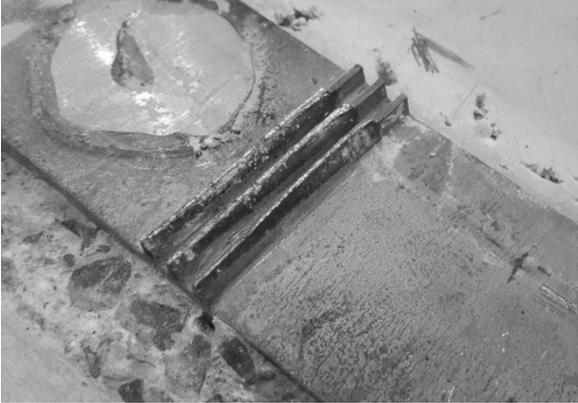
K-A6



Konsolenversuch 2

Zahnreihe	aktivierte Breite [cm]	aktivierte Zahnhöhe [-]	Flächenverteilung [-]	aktivierte Fläche [%]		Zahnreihe	aktivierte Breite [cm]	aktivierte Zahnhöhe [-]	Flächenverteilung [-]	aktivierte Fläche [%]	
S-A1	1	3,13	1	1	89,4	K-A1	1	2,85	1	0,5	40,7
	2	3,05	1	1	87,1		2	2,85	1	0,5	40,7
	3	3,05	1	1	87,1		3	3,08	1	0,5	44
S-A2	1	2,97	1	1	84,9	K-A2	1	2,96	1	0,5	42,3
	2	2,93	1	1	83,7		2	2,96	1	0,5	42,3
	3	2,90	1	1	82,9		3	2,96	1	0,5	42,3
S-A3	1	2,84	1	1	81,1	K-A3	1	2,88	1	0,5	41,1
	2	2,84	1	1	81,1		2	2,88	1	0,5	41,1
	3	2,78	1	1	79,4		3	2,88	1	0,5	41,1
S-A4	1	2,70	1	1	77,1	K-A4	1	2,77	1	0,5	39,6
	2	2,70	1	1	77,1		2	2,77	1	0,5	39,6
	3	2,65	1	1	75,7		3	2,77	1	0,5	39,6
S-A5	1	2,60	1	1	74,3	K-A5	1	2,66	1	1	76
	2	2,64	1	1	75,4		2	2,66	1	1	76
	3	2,60	1	1	74,3		3	2,65	1	1	75,7
S-A6	1	2,50	1	1	71,4	K-A6	1	2,46	1	1	70,3
	2	2,52	1	1	72		2	2,46	1	1	70,3
	3	2,54	1	1	72,6		3	2,46	1	1	70,3
Σ 1426,6 %					Σ 933 %						
von maximal 1800% 79,3 %					von maximal 1800% 51,8 %						

Konsolenversuch 2

Stütze	Konsole
<p data-bbox="443 376 507 409">S-B1</p> 	<p data-bbox="1050 376 1114 409">K-B1</p> 
<p data-bbox="443 878 507 911">S-B2</p> 	<p data-bbox="1050 878 1114 911">K-B2</p> 
<p data-bbox="443 1379 507 1413">S-B3</p> 	<p data-bbox="1050 1379 1114 1413">K-B3</p> 

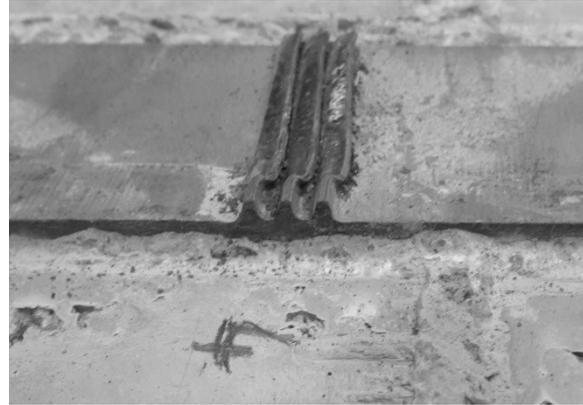
Konsolenversuch 2

Stütze

Konsole

S-B4

K-B4



S-B5

K-B5



S-B6

K-B6



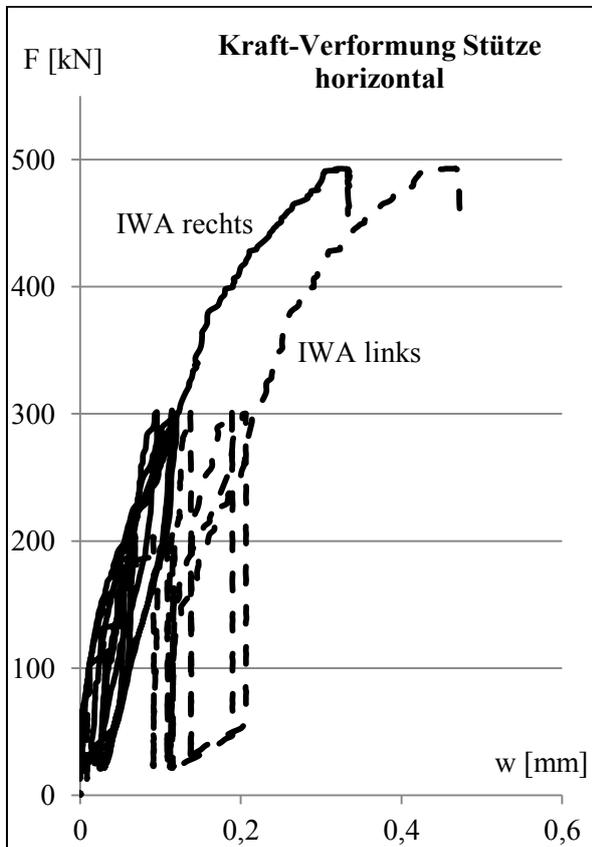
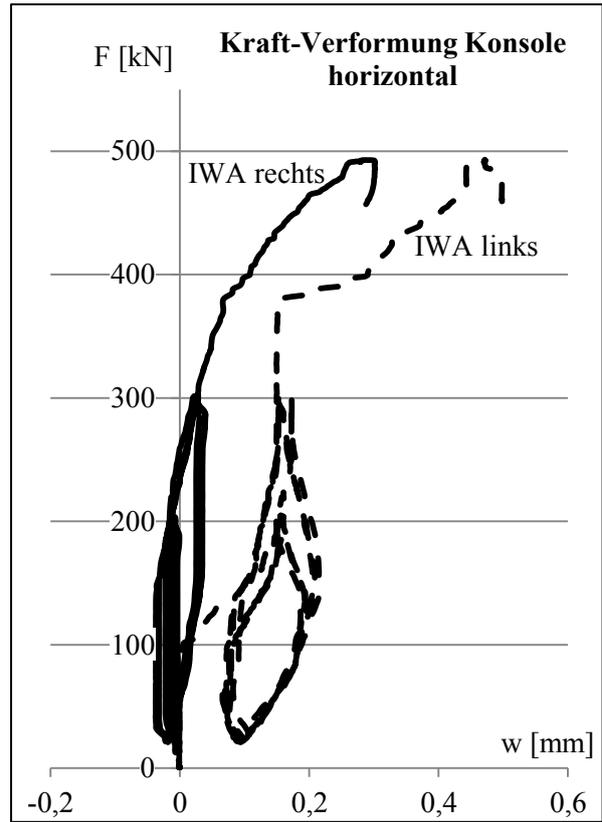
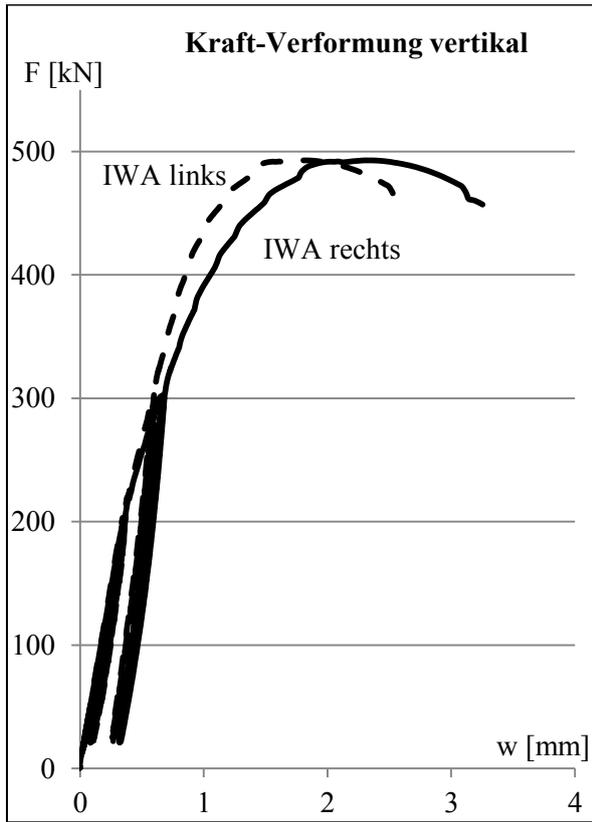
Konsolenversuch 2

Serielle Zahnreihe					Kontinuierliche Zahnreihe						
Zahnreihe	aktivierte Breite	aktivierte Zahnhöhe	Flächenverteilung	aktivierte Fläche	Zahnreihe	aktivierte Breite	aktivierte Zahnhöhe	Flächenverteilung	aktivierte Fläche		
	[cm]	[-]	[-]	[%]		[cm]	[-]	[-]	[%]		
S-B1	1	2,82	1	1	80,6	K-B1	1	2,85	1	0,5	40,7
	2	2,90	1	1	82,9		2	2,85	1	0,5	40,7
	3	2,83	1	1	80,9		3	2,88	1	0,5	41,1
S-B2	1	2,85	1	1	81,4	K-B2	1	2,93	1	1	83,7
	2	2,85	1	1	81,4		2	2,93	1	1	83,7
	3	2,93	1	1	83,7		3	2,94	1	1	84
S-B3	1	2,99	1	1	85,4	K-B3	1	3,01	1	1	86
	2	2,98	1	1	85,1		2	3,01	1	1	86
	3	2,99	1	1	85,4		3	3,01	1	1	86
S-B4	1	2,99	1	1	85,4	K-B4	1	3,05	1	1	87,1
	2	2,99	1	1	85,4		2	3,05	1	1	87,1
	3	2,98	1	1	85,1		3	3,05	1	1	87,1
S-B5	1	3,15	1	1	90	K-B5	1	3,07	1	1	87,7
	2	3,15	1	1	90		2	3,07	1	1	87,7
	3	3,16	1	1	90,3		3	3,07	1	1	87,7
S-B6	1	3,00	1	1	85,7	K-B6	1	3,17	1	1	90,6
	2	3,10	1	1	88,6		2	3,17	1	1	90,6
	3	3,10	1	1	88,6		3	3,17	1	1	90,6
Σ 1535,9 %					Σ 1428,1 %						
von maximal 1800% 85,3 %					von maximal 1800% 79,3 %						

Konsolenversuch 3

Bezeichnung	Konsolenversuch 3		
Beschreibung	Konsole mit 2 Zahnleisten mit jeweils 6 x 3 Stahlzähnen (GT5) Alle Gewindestangen mit 1200 Nm angezogen		
Herstelldatum	19.+20.10.2016	Betonalter	39d
Prüfdatum	29.11.2016	Lagerung	an der Luft
Zylinderfestigkeit	121,35 [N/mm ²]		
Prüfmaschine	Prüfportal (Zwick/Roell) 2,5 MN		
Wegaufnehmer	2x horizontal an der Stütze 2x horizontal an der Konsole 2x vertikal unter der Konsole 1x vertikal im Zylinder		
Versuchs- beobachtungen	Stütze steht schief auf Widerlager. Durch Stahlplatten wird die Schiefstellung ausgeglichen. Nach dem Versuch: Starke Rissbildung an der Konsole im Bereich der eingelegten Stahlplatte. Die aufgebrachten Vorspannungen sind noch vorhanden.		
Bruchlast	[kN]	493,5	
Reibungsanteil	[kN]	~ 18,9 (aus Versuch)	
Belastungsgeschwindigkeit	0,6 mm/min = 0,01 mm/sek		
Belastungsprotokoll	s. Kap. 6		

Konsolenversuch 3



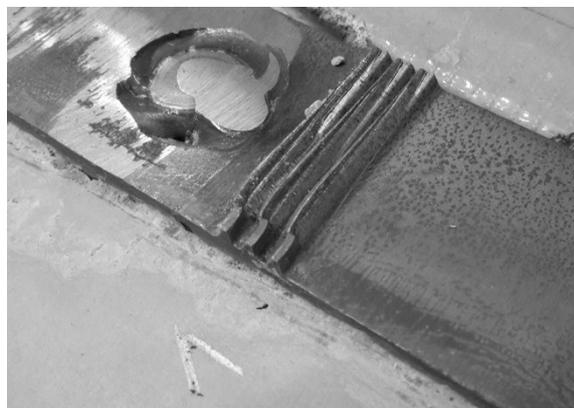
Konsolenversuch 3

Stütze

Konsole

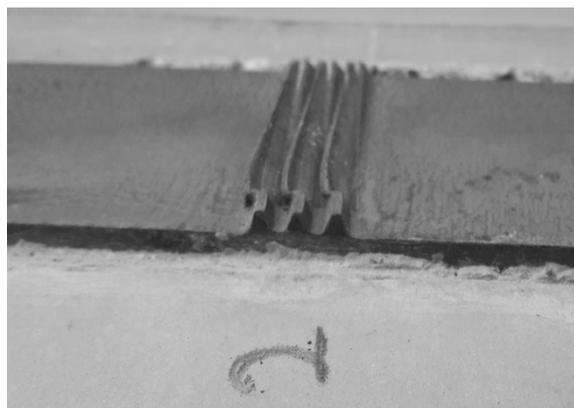
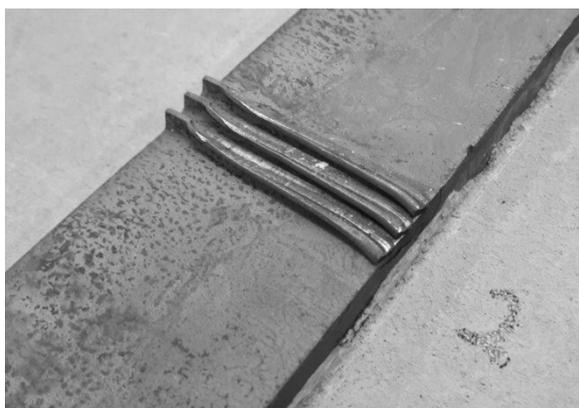
S-A1

K-A1



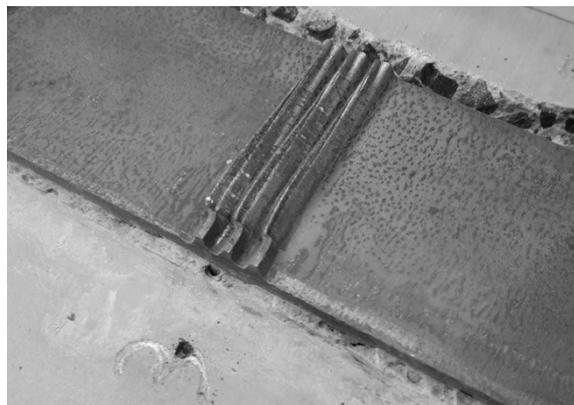
S-A2

K-A2



S-A3

K-A3



Konsolenversuch 3

Stütze

Konsole

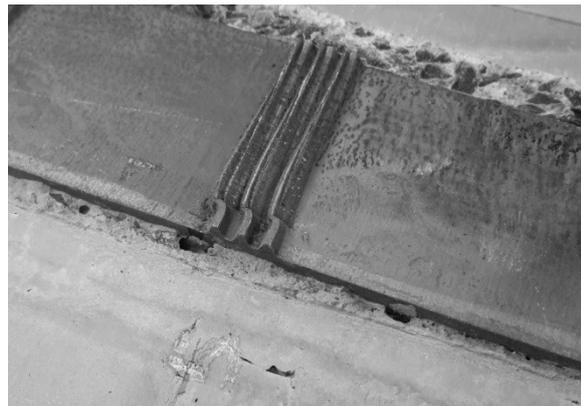
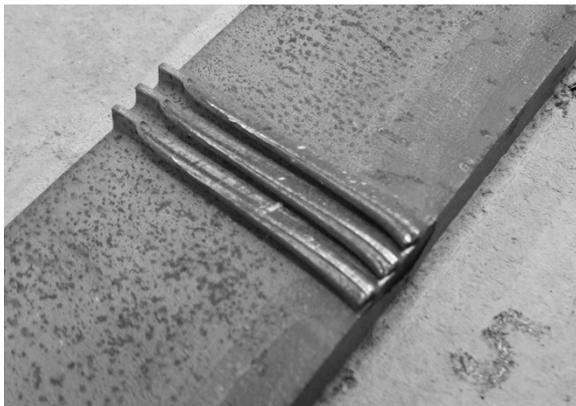
S-A4

K-A4



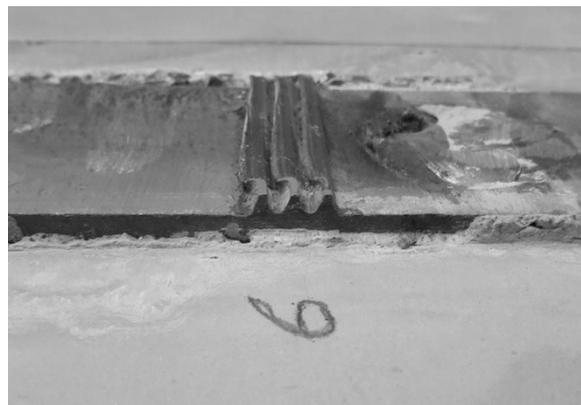
S-A5

K-A5



S-A6

K-A6



Konsolenversuch 3

Serielle Zahnreihe					Kontinuierliche Zahnreihe						
Zahnreihe		aktivierte Breite	aktivierte Zahnhöhe	Flächenverteilung	aktivierte Fläche	Zahnreihe		aktivierte Breite	aktivierte Zahnhöhe	Flächenverteilung	aktivierte Fläche
		[cm]	[-]	[-]	[%]			[cm]	[-]	[-]	[%]
S-A1	1	3,10	1	1	88,6	K-A1	1	3,1	1	1	88,6
	2	3,08	1	1	88		2	3,1	1	1	88,6
	3	3,05	1	1	87,1		3	3,1	1	1	88,6
S-A2	1	3,00	1	1	85,7	K-A2	1	3,1	1	1	88,6
	2	2,98	1	1	85,1		2	3,1	1	1	88,6
	3	2,98	1	1	85,1		3	3,1	1	1	88,6
S-A3	1	3,04	1	1	86,9	K-A3	1	3,1	1	1	88,6
	2	3,04	1	1	86,9		2	3,1	1	1	88,6
	3	3,00	1	1	85,7		3	3,1	1	1	88,6
S-A4	1	3,03	1	1	86,6	K-A4	1	3,06	1	1	87,4
	2	3,05	1	1	87,1		2	3,06	1	1	87,4
	3	3,05	1	1	87,1		3	3,06	1	1	87,4
S-A5	1	3,03	1	1	86,6	K-A5	1	3,06	1	1	87,4
	2	3,01	1	1	86		2	3,06	1	1	87,4
	3	3,08	1	1	88		3	3,06	1	1	87,4
S-A6	1	3,03	1	1	86,6	K-A6	1	3,06	1	1	87,4
	2	3,00	1	1	85,7		2	3,06	1	1	87,4
	3	3,00	1	1	85,7		3	3,06	1	1	87,4
					Σ 1558,5 %						Σ 1584 %
					von maximal 1800% 86,6 %						von maximal 1800% 88 %

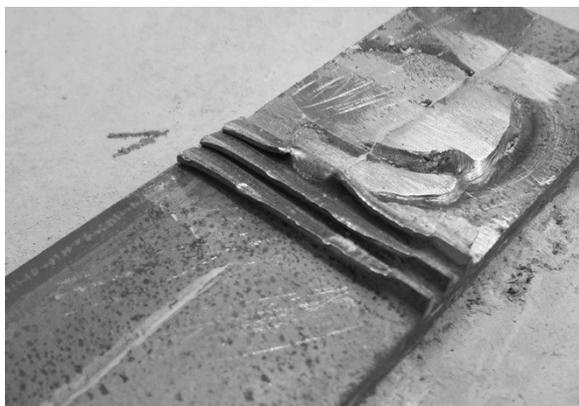
Konsolenversuch 3

Stütze

Konsole

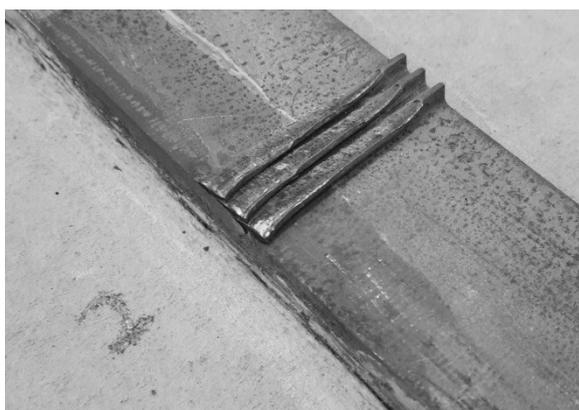
S-B1

K-B1



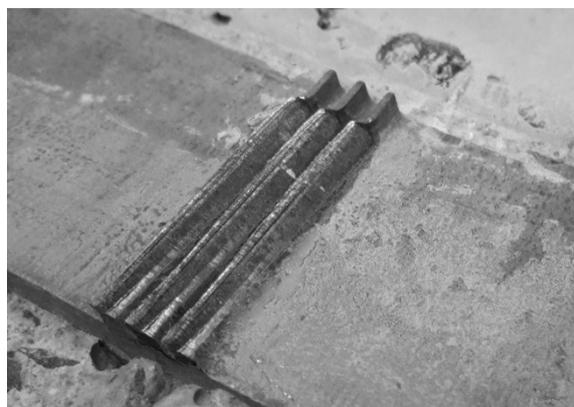
S-B2

K-B2



S-B3

K-B3



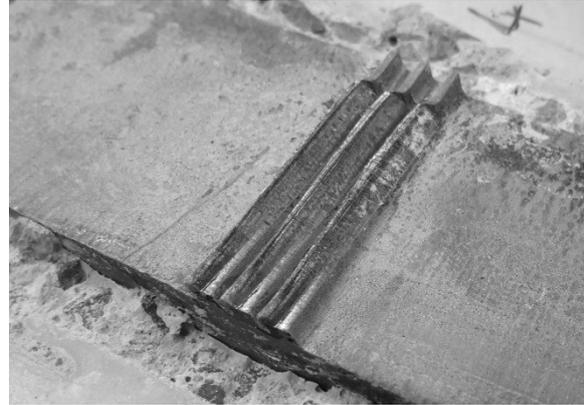
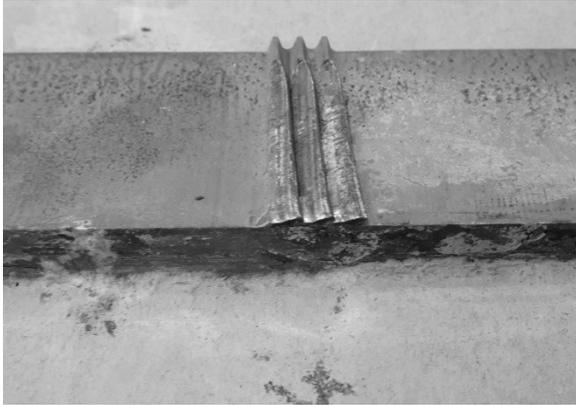
Konsolenversuch 3

Stütze

Konsole

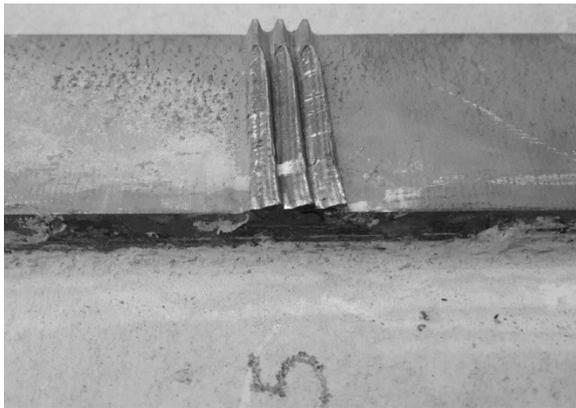
S-B4

K-B4



S-B5

K-B5



S-B6

K-B6



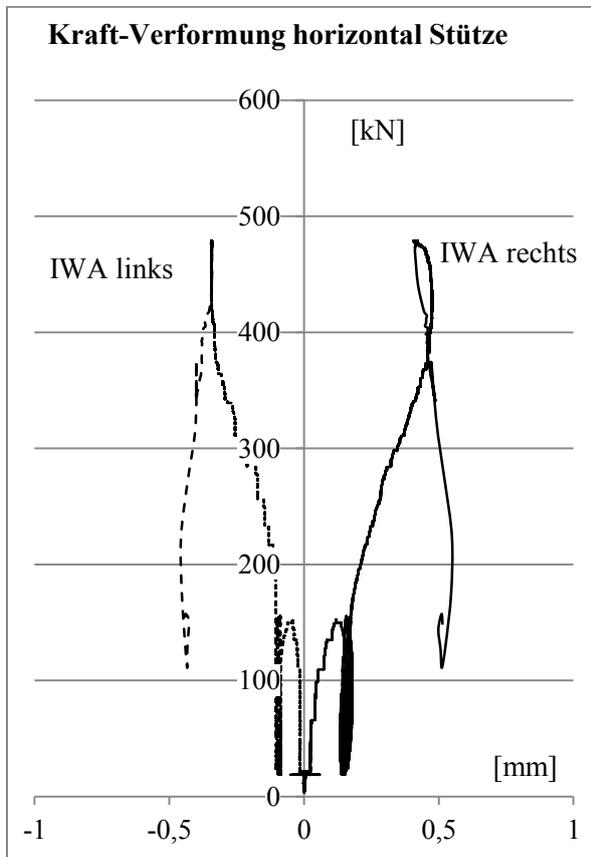
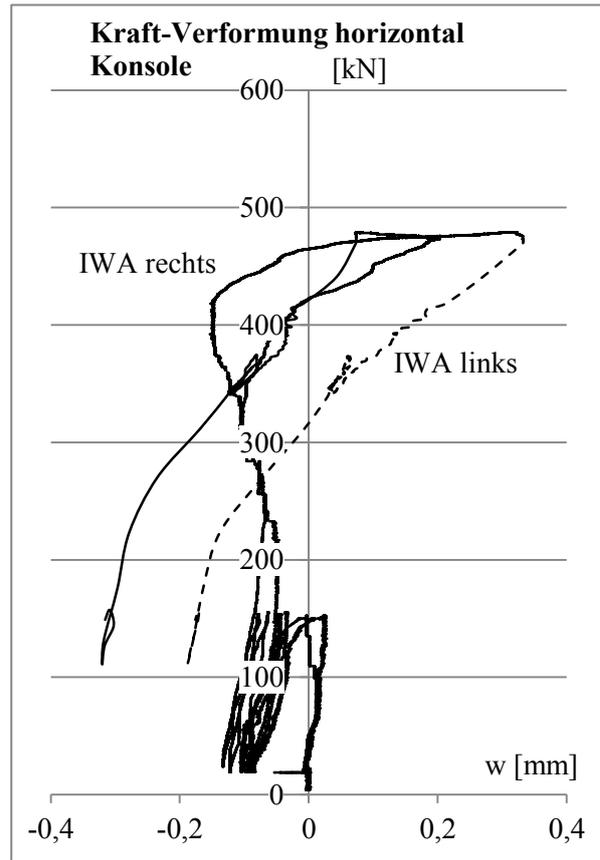
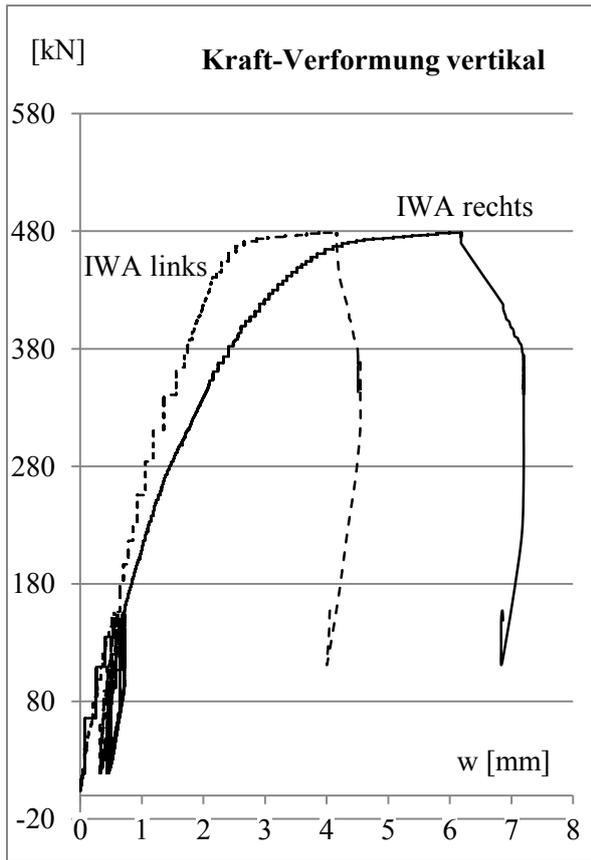
Konsolenversuch 3

Serielle Zahnreihe					Kontinuierliche Zahnreihe						
Zahnreihe	aktivierte Breite	aktivierte Zahnhöhe	Flächenverteilung	aktivierte Fläche	Zahnreihe	aktivierte Breite	aktivierte Zahnhöhe	Flächenverteilung	aktivierte Fläche		
	[cm]	[-]	[-]	[%]		[cm]	[-]	[-]	[%]		
S-B1	1	3,01	1	1	86	K-B1	1	3,05	1	1	87,1
	2	3,00	1	1	85,7		2	2,97	1	1	84,9
	3	3,00	1	1	85,7		3	2,97	1	1	84,9
S-B2	1	2,95	1	1	84,3	K-B2	1	2,97	1	1	84,9
	2	2,95	1	1	84,3		2	2,97	1	1	84,9
	3	2,95	1	1	84,3		3	2,97	1	1	84,9
S-B3	1	2,90	1	1	82,9	K-B3	1	2,9	1	1	82,9
	2	2,90	1	1	82,9		2	2,9	1	1	82,9
	3	2,97	1	1	84,9		3	2,9	1	1	82,9
S-B4	1	2,96	1	1	84,6	K-B4	1	2,84	1	1	81,1
	2	2,96	1	1	84,6		2	2,84	1	1	81,1
	3	2,96	1	1	84,6		3	2,84	1	1	81,1
S-B5	1	2,83	1	1	80,9	K-B5	1	2,84	1	1	81,1
	2	2,83	1	1	80,9		2	2,84	1	1	81,1
	3	2,83	1	1	80,9		3	2,84	1	1	81,1
S-B6	1	2,64	1	1	75,4	K-B6	1	2,8	1	1	80
	2	2,64	1	1	75,4		2	2,8	1	1	80
	3	2,73	1	1	78		3	2,8	1	1	80
Σ 1486,3 %					Σ 1486,9 %						
von maximal 1800% 82,6 %					von maximal 1800% 82,6 %						

Dokumentation der Versuche III/V4-6

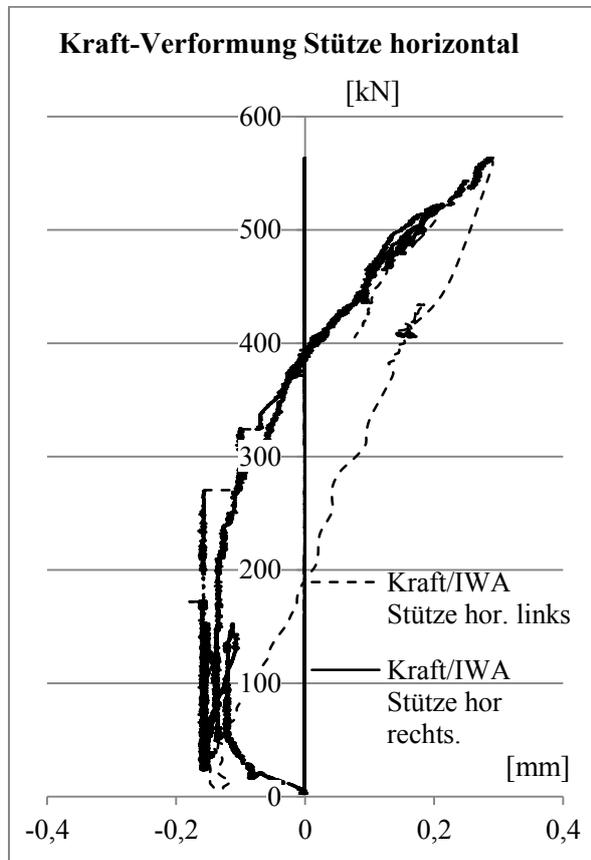
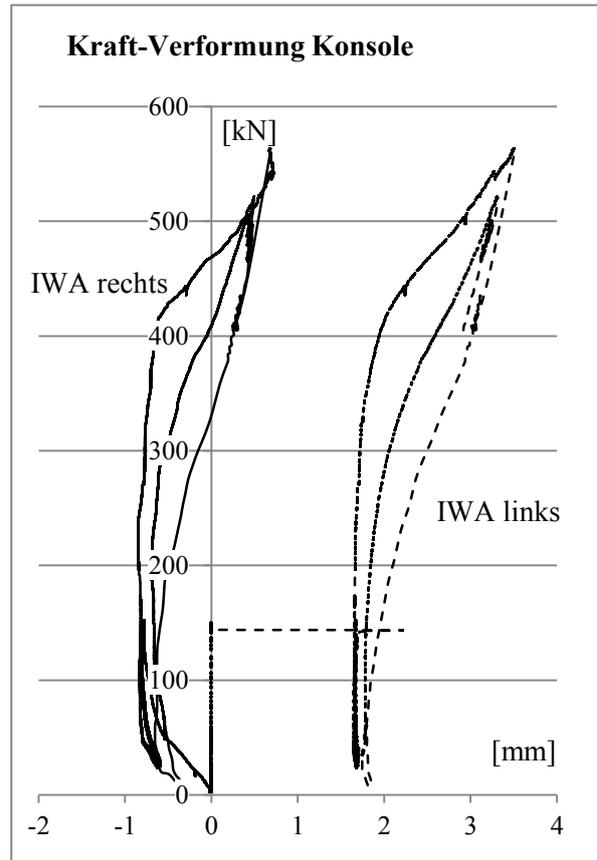
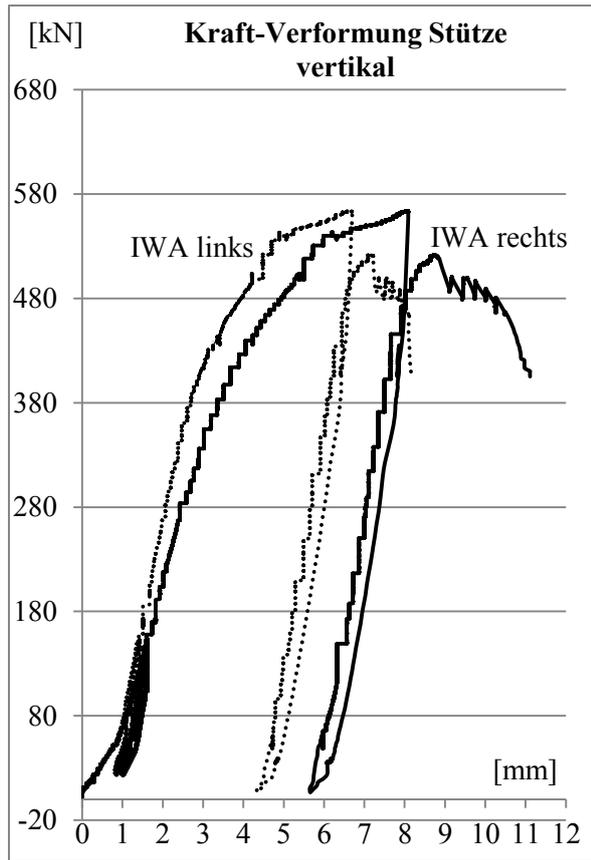
Konsolenversuch 4

Bezeichnung	Konsolenversuch 4		
Beschreibung	Konsole mit 2 Zahnleisten mit jeweils 4 x 3 Stahlzähnen (GT5) Alle Gewindestangen mit 1200 Nm vorgespannt		
Herstelldatum	11.09.2017	Betonalter	29d
Prüfdatum	10.10.2017	Lagerung	an der Luft
Zylinderfestigkeit	80,13 [N/mm ²]		
Prüfmaschine	Prüfportal (Zwick/Roell) 2,5 MN		
Wegaufnehmer	2x horizontal an der Stütze 2x horizontal an der Konsole 2x vertikal unter der Konsole 1x vertikal im Zylinder		
Versuchs- beobachtungen			
Bruchlast	[kN]	471	
Reibungsanteil	[kN]	~ 0,0	
Belastungsgeschwindigkeit	0,6 mm/min = 0,01 mm/sek		
Belastungsprotokoll	s. Kap. 6		



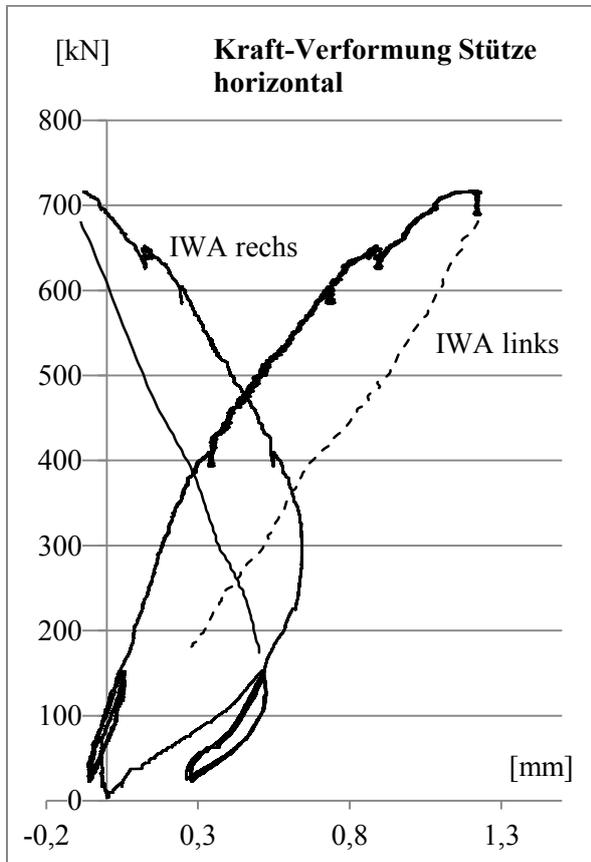
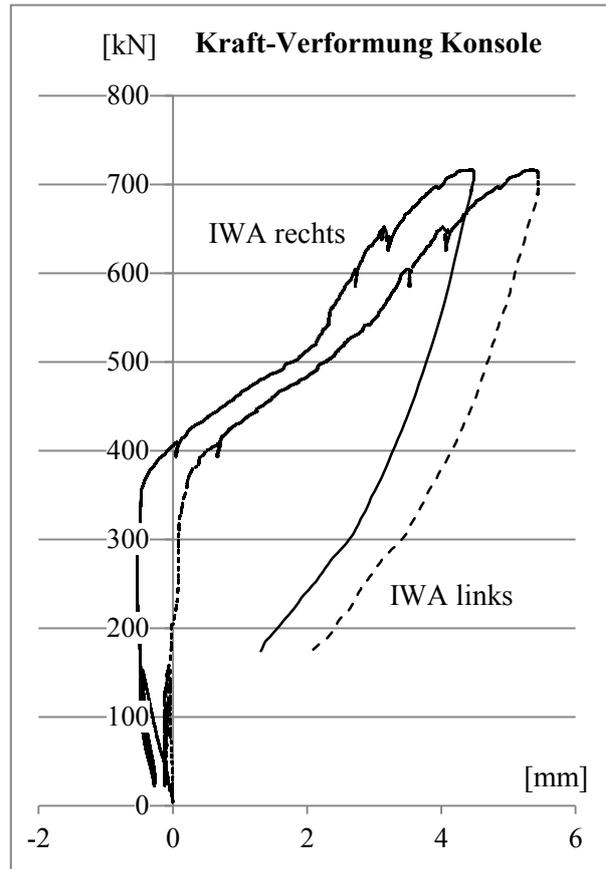
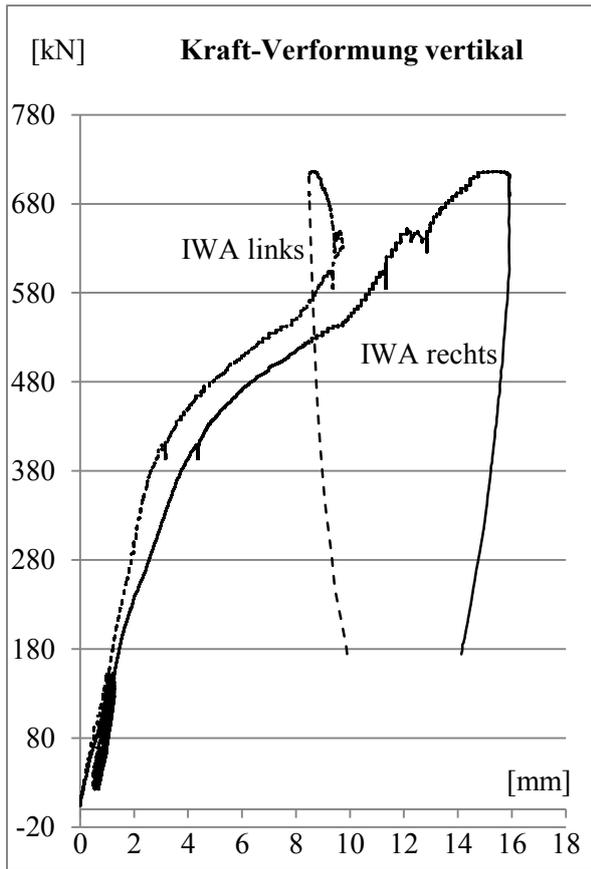
Konsolenversuch 5

Bezeichnung	Konsolenversuch 5		
Beschreibung	Konsole mit 2 Zahnleisten mit jeweils 1 x 12 Stahlzähnen (GT5) Alle Gewindestangen mit 12000 Nm vorgespannt		
Herstelldatum	11.09.2017	Betonalter	29d
Prüfdatum	10.10.2017	Lagerung	an der Luft
Zylinderfestigkeit	82,73 [N/mm ²]		
Prüfmaschine	Prüfportal (Zwick/Roell) 2,5 MN		
Wegaufnehmer	2x horizontal an der Stütze 2x horizontal an der Konsole 2x vertikal unter der Konsole 1x vertikal im Zylinder		
Versuchs- beobachtungen	Es entsteht ein Querschnitt, der von der Lasteinleitung ins Zentrum des Druckpunktes verläuft.		
Bruchlast	[kN]	521	
Reibungsanteil	[kN]	~ 0,0	
Belastungsgeschwindigkeit	0,6 mm/min = 0,01 mm/sek		
Belastungsprotokoll	s. Kap. 6		



Konsolenversuch 6

Bezeichnung	Konsolenversuch 6		
Beschreibung	Konsole mit 2 Zahnleisten mit jeweils 1 x 5 Stahlzähnen (GT3) Alle Gewindestangen mit 1200 Nm vorgespannt		
Herstelldatum	11.09.2017	Betonalter	29d
Prüfdatum	10.10.2017	Lagerung	an der Luft
Zylinderfestigkeit	87,35 [N/mm ²]		
Prüfmaschine	Prüfportal (Zwick/Roell) 2,5 MN		
Wegaufnehmer	2x horizontal an der Stütze 2x horizontal an der Konsole 2x vertikal unter der Konsole 1x vertikal im Zylinder		
Versuchs- beobachtungen	Es entsteht ein Querschnitt, der von der Lasteinleitung ins Zentrum des Druckpunktes verläuft.		
Bruchlast	[kN]	705	
Reibungsanteil	[kN]	~ 0,0	
Belastungsgeschwindigkeit	0,6 mm/min = 0,01 mm/sek		
Belastungsprotokoll	s. Kap. 6		



Anhang C4: Dokumentation Versuche Phase IV

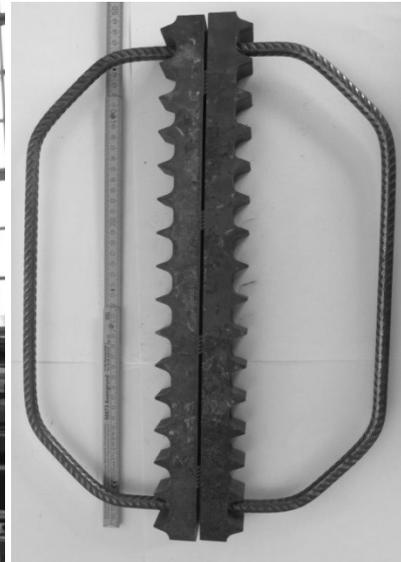


Abb.C4.1: Versuchsaufbau Knotenpunkt (links) und Zahnleistenpaar (rechts)

Tab. C4.1: Prüfprogramm Phase IV

Versuchsnr.	Zahngeometrie	Anordnung der Zähne	n Zahn S/B	n Zahn S/S	Kraftneigung α	Abmessungen b/t/L [cm]				Material Stahl	Material Beton
						Pfosten	Diagonale	Knoten-element	Gurt		
III/V4	GT5	Gruppen	16	44	48,6	22/22/ 30	22/22/ 30	23,5/35/ 63	31/35/ 166	S 1	Ult
III/V5					48,6						
III/V6					48,5						
Ult = Ultralith Bet = Betec											

Es werden die Versagensbilder der Stahlzähne dokumentiert indem die einzelnen Zahnreihen fotografiert und mit einem Messschieber vermessen werden (Abb. C4.3). Der Knoten wird auf den Gurt geklappt, so dass jeweils die Zahnleisten A-A bzw. B-B aufeinanderliegen (Hofmann 2017).

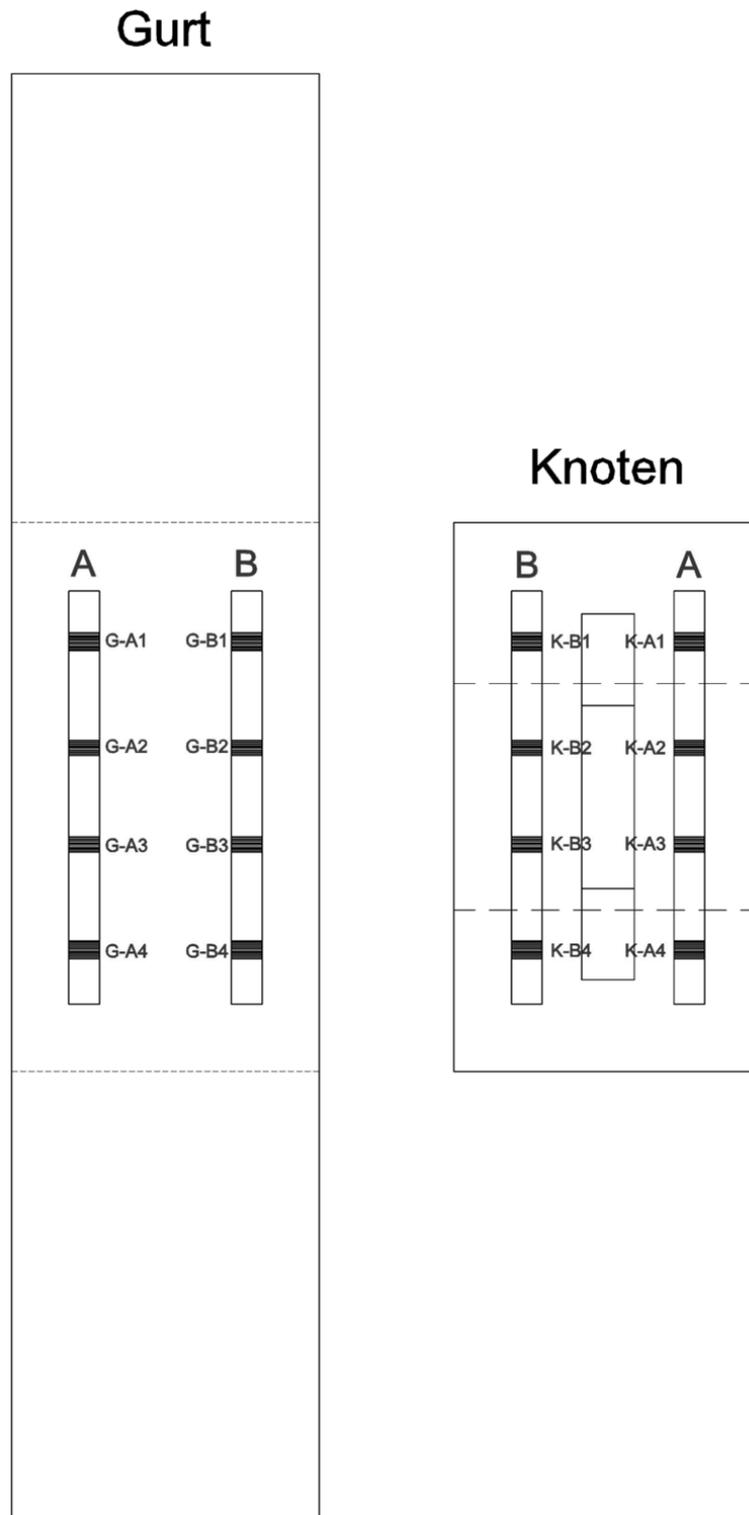
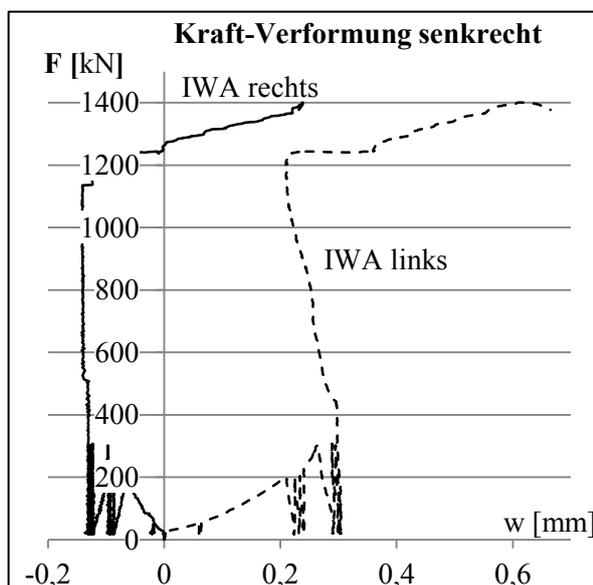
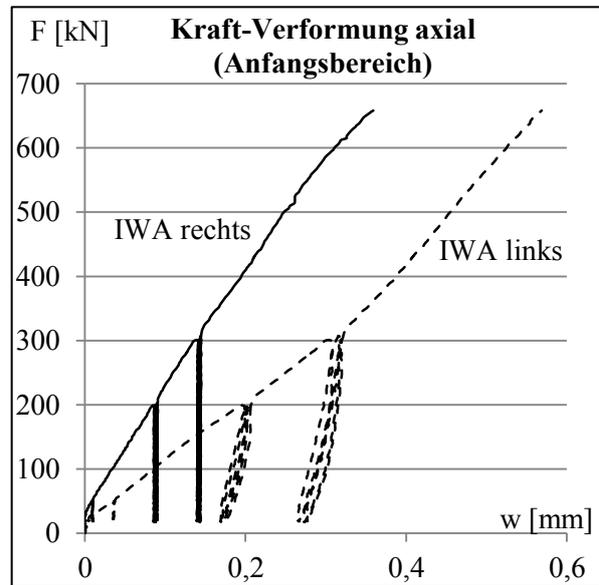
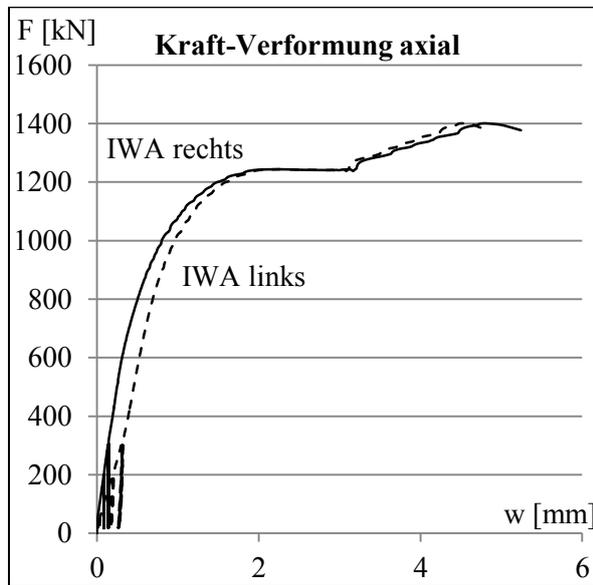
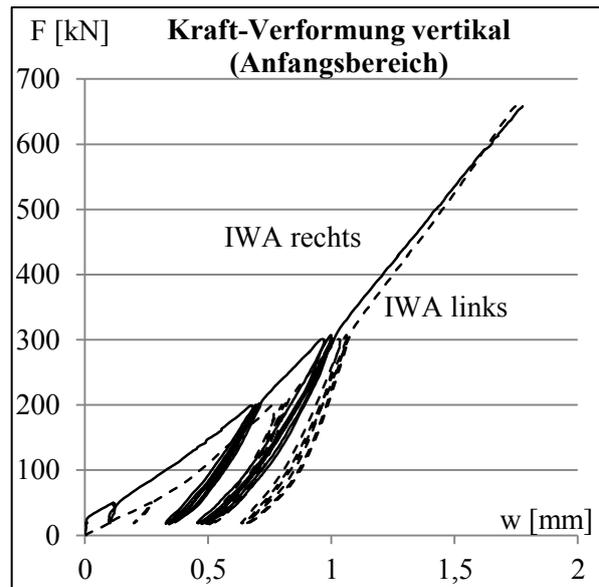
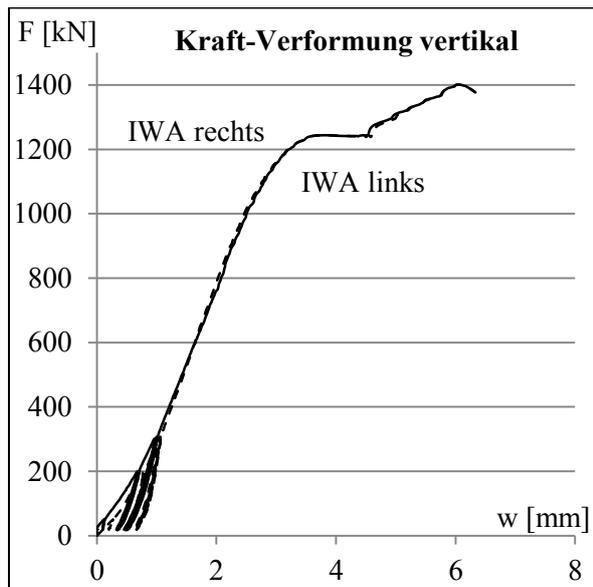


Abb. C4.3: Bezeichnung der Zahnreihen der Knotenpunkte

Knotenversuch 1

Bezeichnung	Knotenversuch 1		
Beschreibung	Knoten mit 2 Zahnleisten mit jeweils 2x5 und 2x6 Stahlzähnen Gewindestange mit 125 kN vorgespannt		
Herstelldatum	19.+20.10.2016	Betonalter	53d
Prüfdatum	13.12.2016	Lagerung	an der Luft
Zylinderfestigkeit	121,35 [N/mm ²]		
Prüfmaschine	Prüfportal (Zwick/Roell) 2,5 MN		
Wegaufnehmer	2x vertikal unter der Lasteinleitung 2x senkrecht zur Fuge 2x axial zur Fuge 1x vertikal im Zylinder		
Versuchs- beobachtungen	Leichte Schiefstellung des Probekörpers. Leichte Abplatzungen am Betonquader der Lasteinleitung bei 1,0 MN aus Schiefstellung.		
Bruchlast	[kN]	1401,8	
Belastungsgeschwindigkeit	0,6 mm/min = 0,01 mm/sek		
Belastungsprotokoll	siehe Kapitel 7		

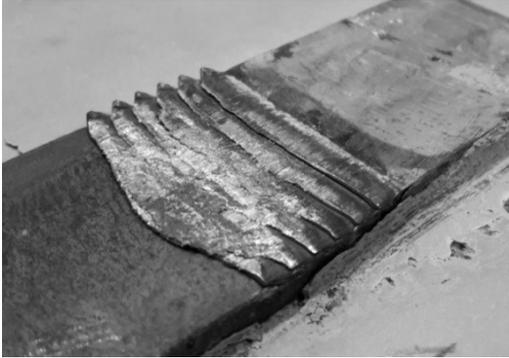
Knotenversuch 1



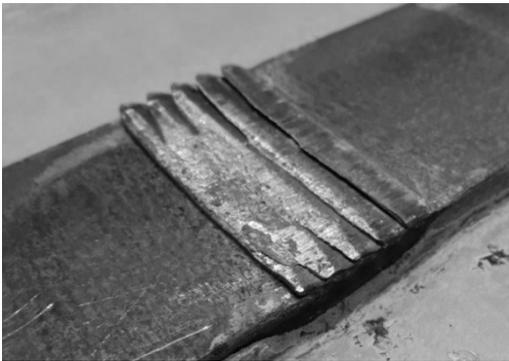
Knotenversuch 1

Gurt

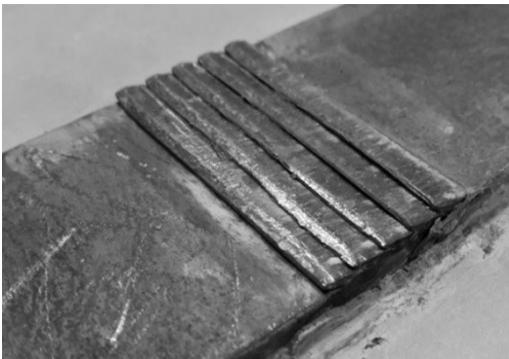
G-A1



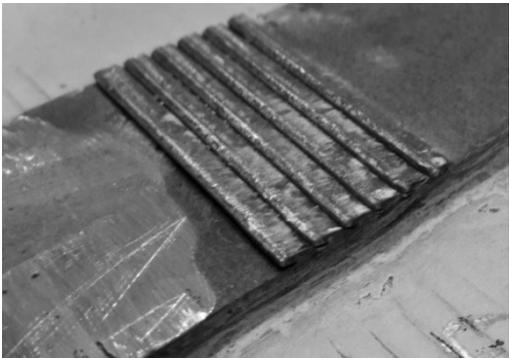
G-A2



G-A3

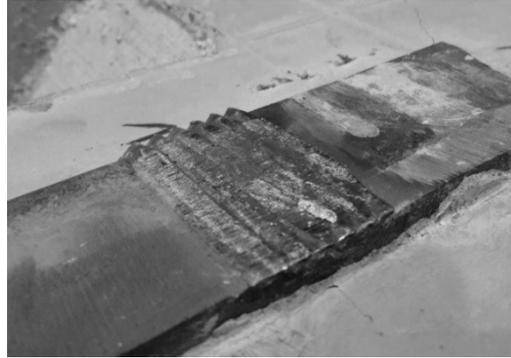


G-A4

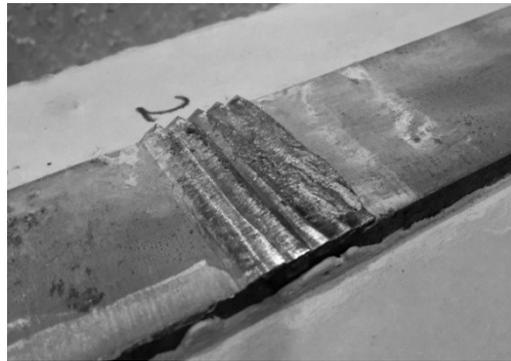


Knoten

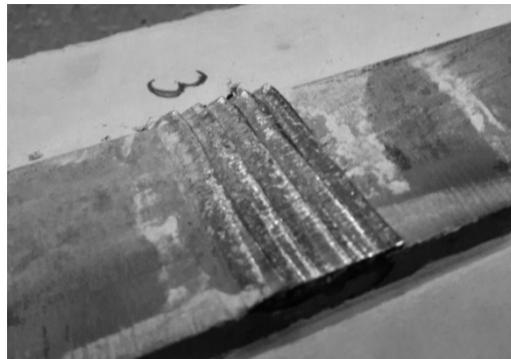
K-A1



K-A2



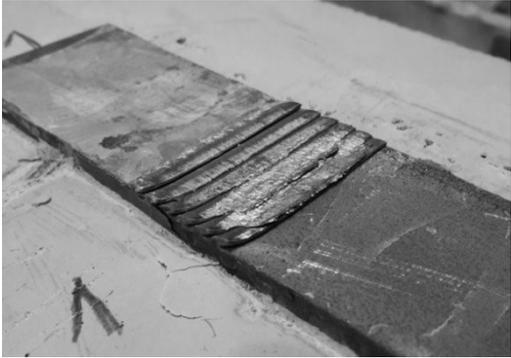
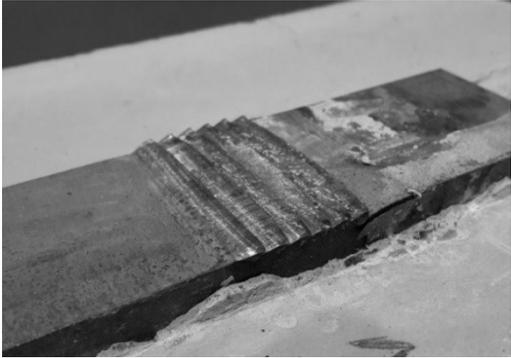
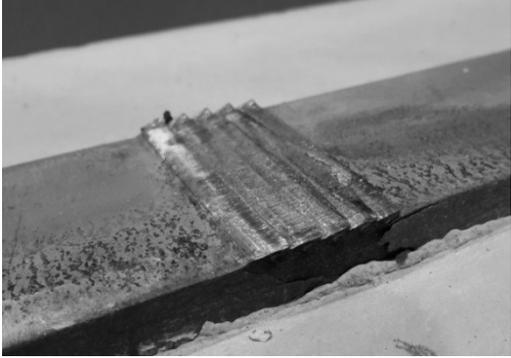
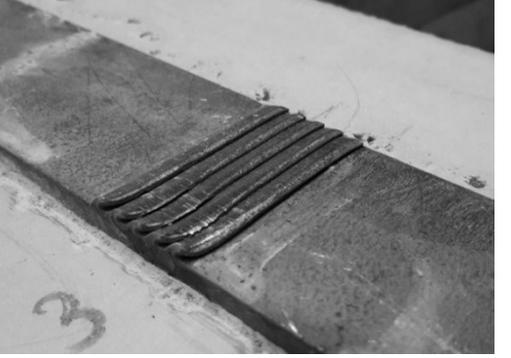
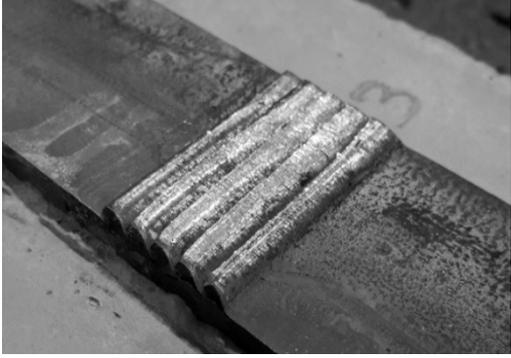
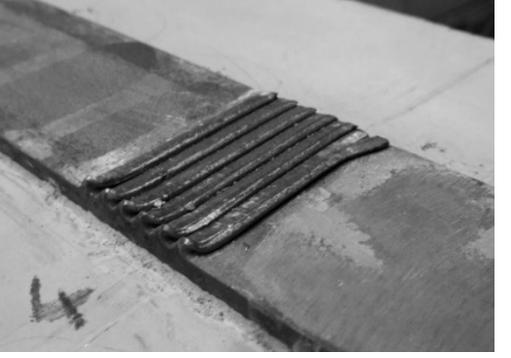
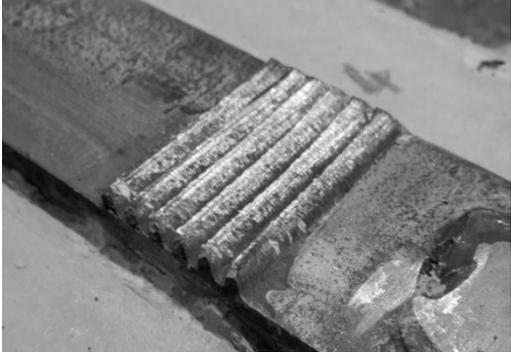
K-A3



K-A4



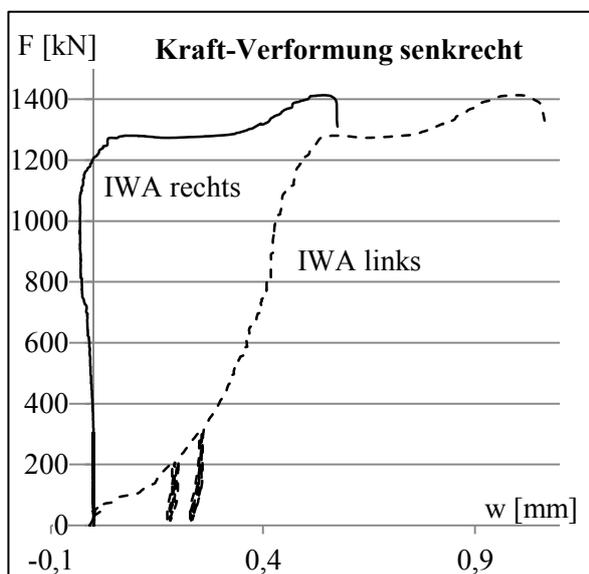
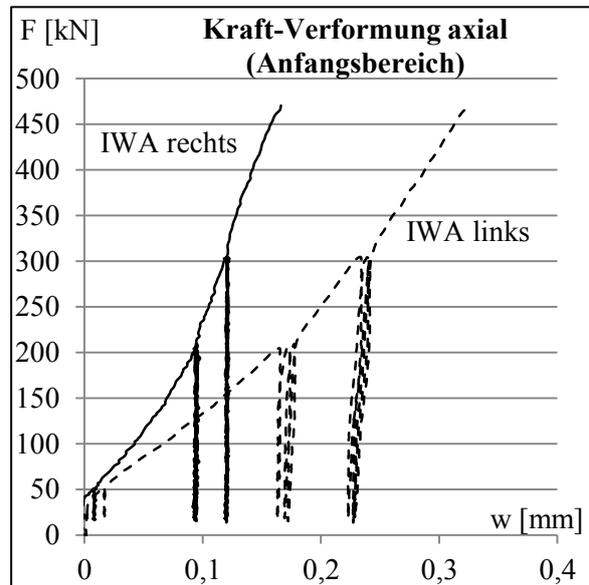
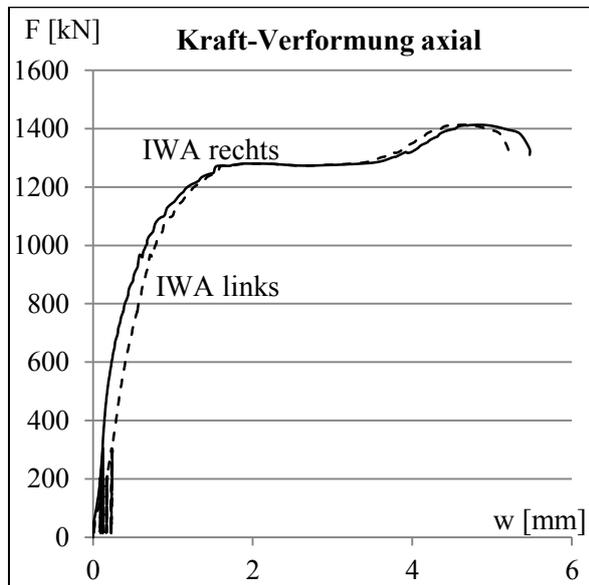
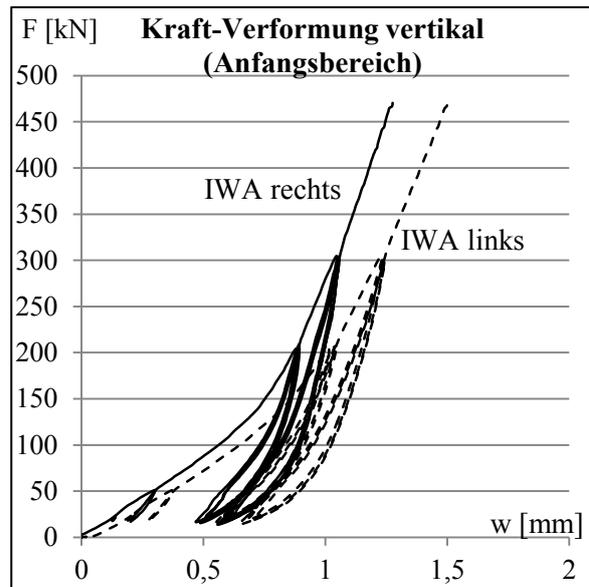
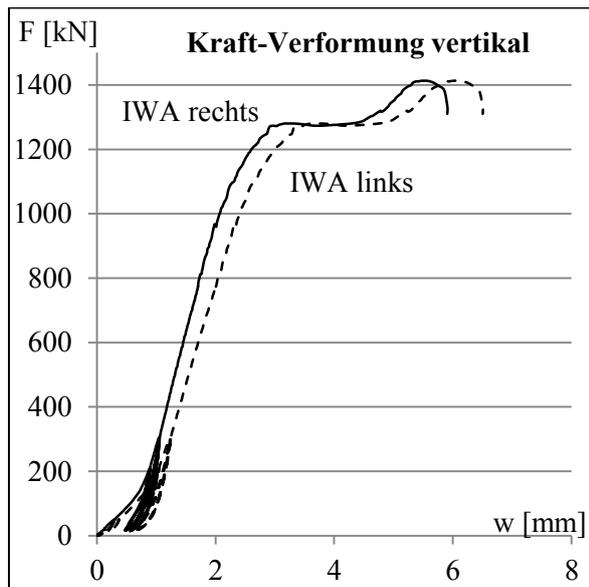
Knotenversuch 1

<i>Gurt</i>	<i>Knoten</i>
<i>G-B1</i> 	<i>K-B1</i> 
<i>G-B2</i> 	<i>K-B2</i> 
<i>G-B3</i> 	<i>K-B3</i> 
<i>G-B4</i> 	<i>K-B4</i> 

Knotenversuch 2

Bezeichnung	Knotenversuch 2		
Beschreibung	Knoten mit 2 Zahnleisten mit jeweils 2x5 und 2x6 Stahlzähnen Gewindestange mit 125 kN vorgespannt		
Herstelldatum	19.+20.10.2016	Betonalter	54d
Prüfdatum	14.12.2016	Lagerung	an der Luft
Zylinderfestigkeit	121,35 [N/mm ²]		
Prüfmaschine	Prüfportal (Zwick/Roell) 2,5 MN		
Wegaufnehmer	2x vertikal unter der Lasteinleitung 2x senkrecht zur Fuge 2x axial zur Fuge 1x vertikal im Zylinder		
Versuchs- beobachtungen	Gute Lage des Probekörpers im Widerlager. Versuch wird unmittelbar vor Erreichen der Bruchlast beendet um das Versagensbild der Zähne besser erkennen zu können.		
Bruchlast	[kN]	1414,1	
Belastungsgeschwindigkeit	0,6 mm/min = 0,01 mm/sek		
Belastungsprotokoll	siehe Kapitel 7		

Knotenversuch 2



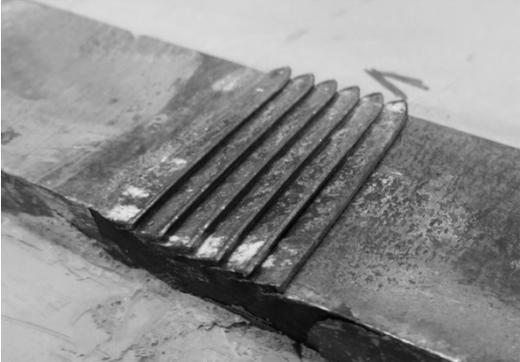
Knotenversuch 2

Gurt

Knoten

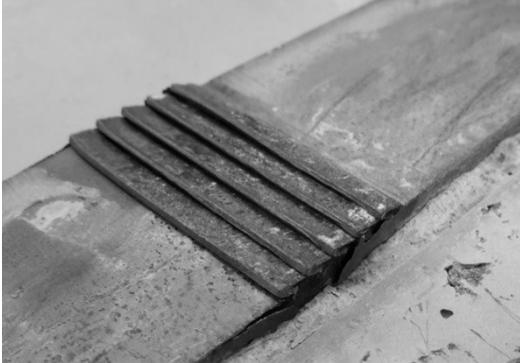
G-A1

K-A1



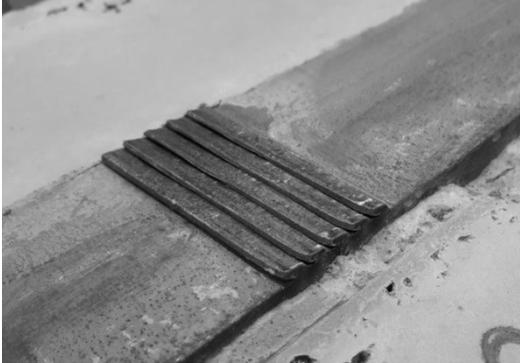
G-A2

K-A2



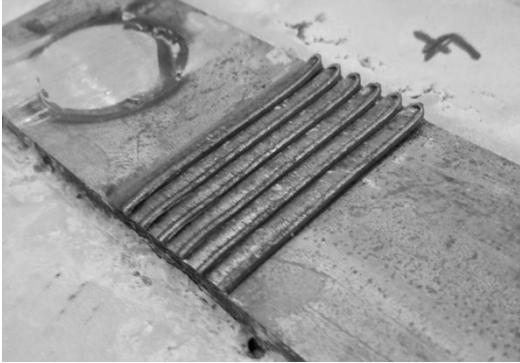
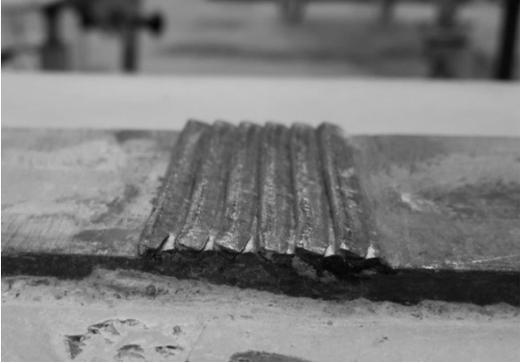
G-A3

K-A3



G-A4

K-A4



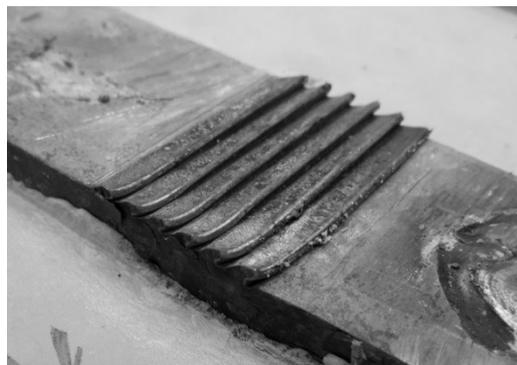
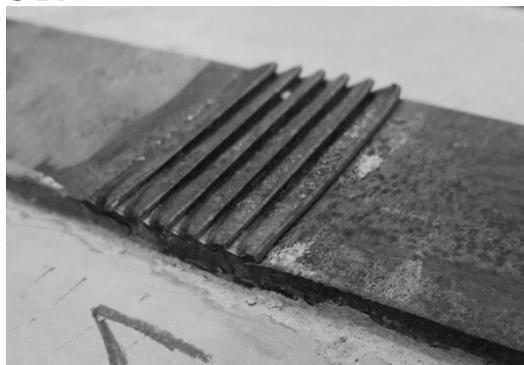
Knotenversuch 2

Gurt

Knoten

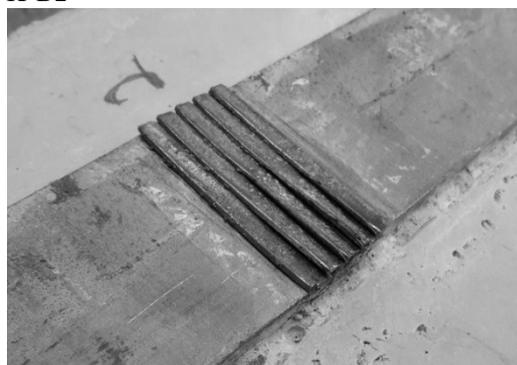
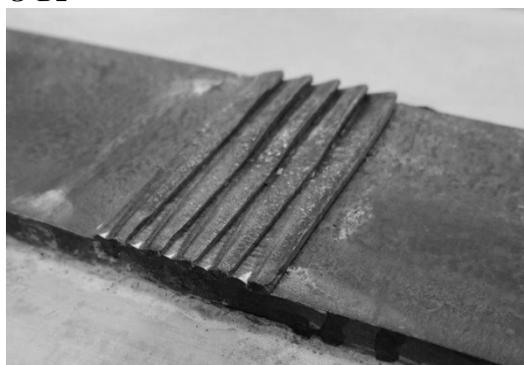
G-B1

K-B1



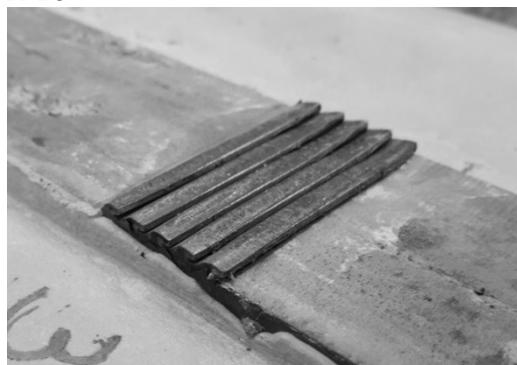
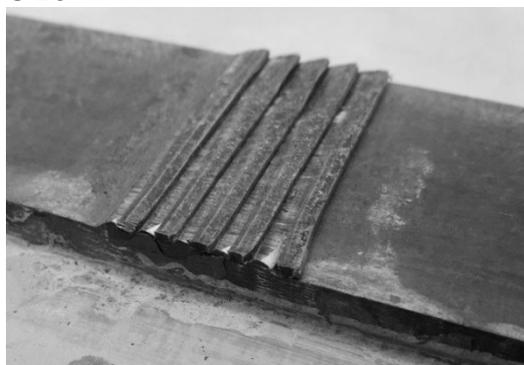
G-B2

K-B2



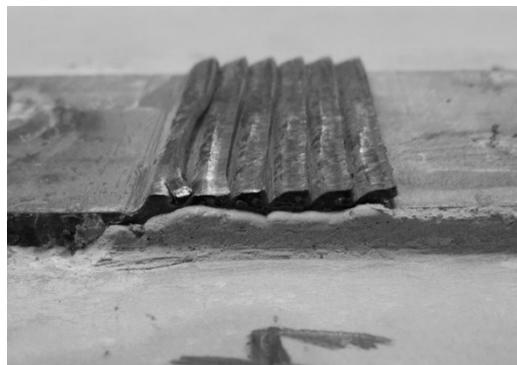
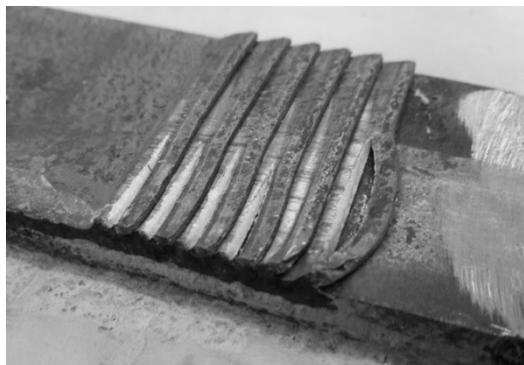
G-B3

K-B3



G-B4

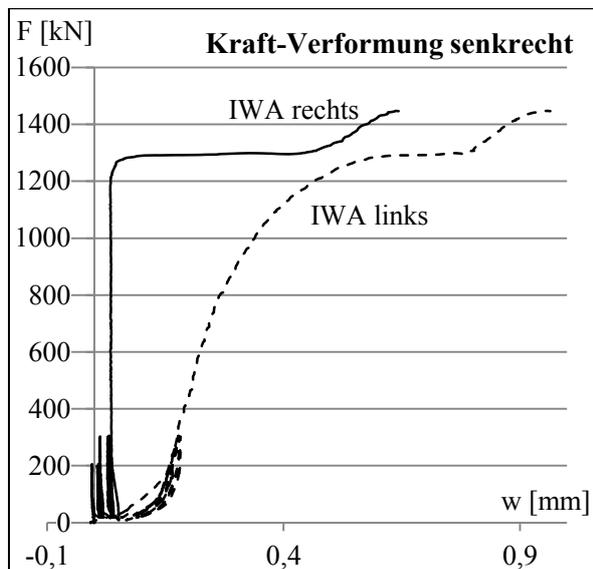
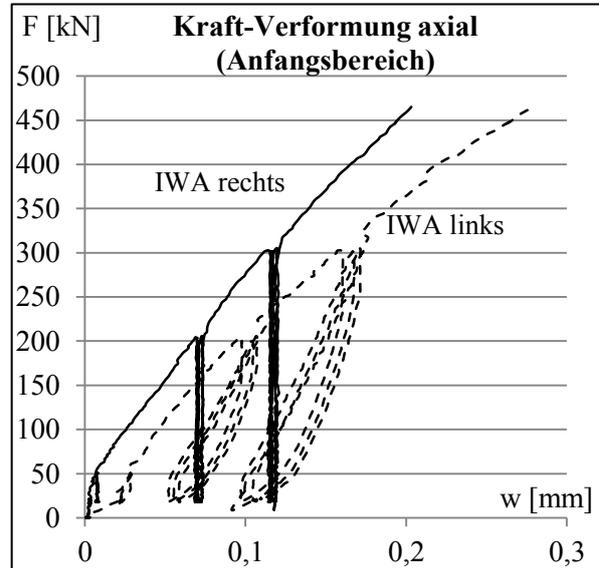
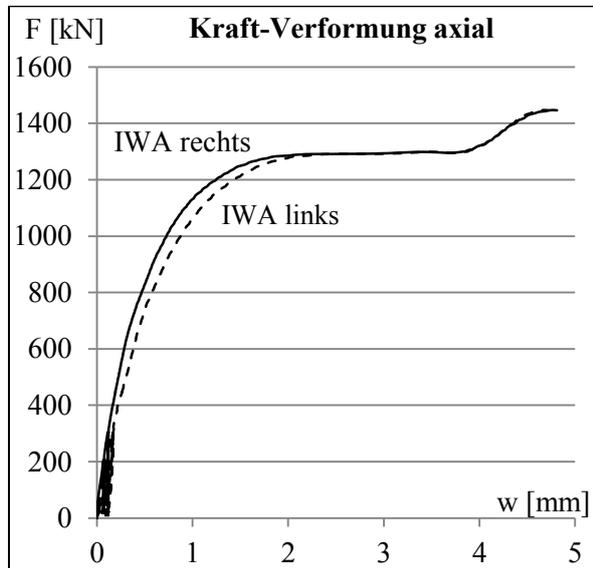
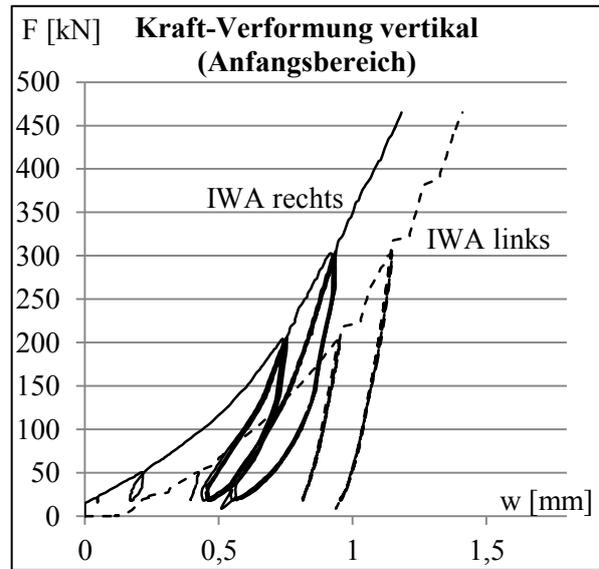
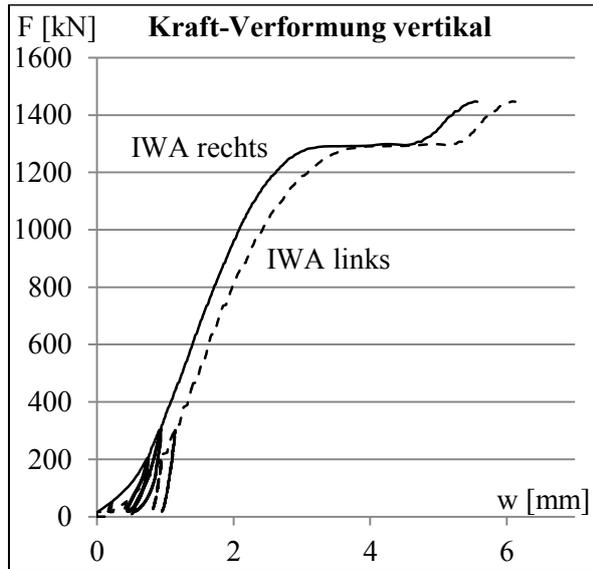
K-B4



Knotenversuch 3

Bezeichnung	Knotenversuch 3		
Beschreibung	Knoten mit 2 Zahnleisten mit jeweils 2x5 und 2x6 Stahlzähnen Gewindestange mit 125 kN vorgespannt		
Herstelldatum	19.+20.10.2016	Betonalter	54d
Prüfdatum	14.12.2016	Lagerung	an der Luft
Zylinderfestigkeit	121,35 [N/mm ²]		
Prüfmaschine	Prüfportal (Zwick/Roell) 2,5 MN		
Wegaufnehmer	2x vertikal unter der Lasteinleitung 2x senkrecht zur Fuge 2x axial zur Fuge 1x vertikal im Zylinder		
Versuchs- beobachtungen	Versuch kurz vor Erreichen der Bruchlast beendet. Durch die Reaktionszeit des Systems ist der Probekörper dennoch versagt. Nach dem Versuch: Starke Rissbildung im Knotenelement durch Biegung des Bauteils.		
Bruchlast	[kN]	1448,3	
Belastungsgeschwindigkeit	0,6 mm/min = 0,01 mm/sek		
Belastungsprotokoll	siehe Kapitel 7		

Knotenversuch 3



Knotenversuch 3

Gurt

Knoten

G-A1

K-A1



G-A2

K-A2



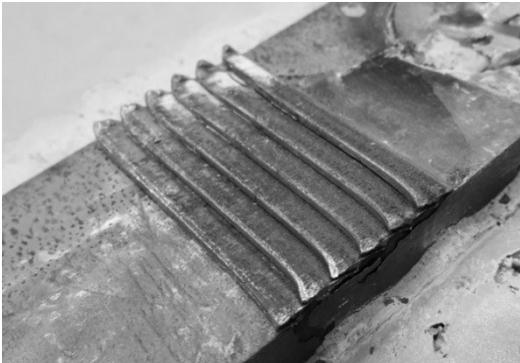
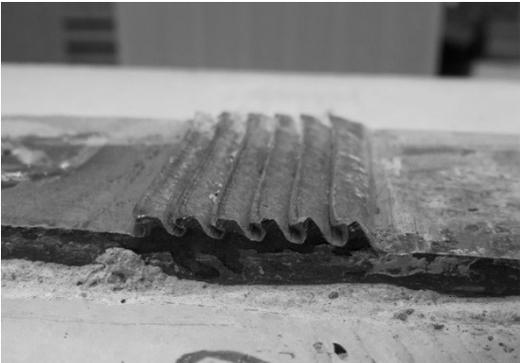
G-A3

K-A3



G-A4

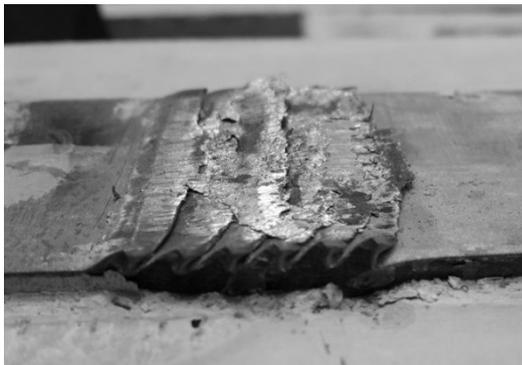
K-A4



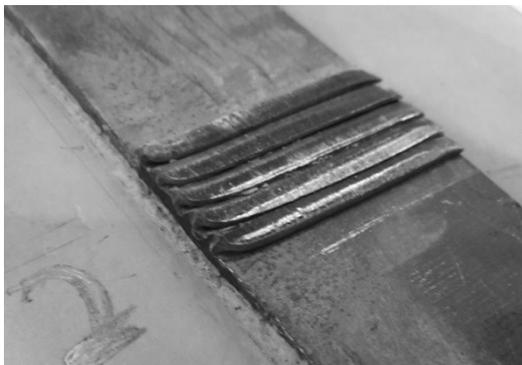
Knotenversuch 3

Gurt

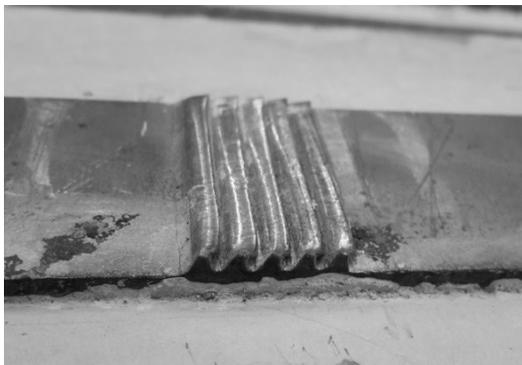
G-B1



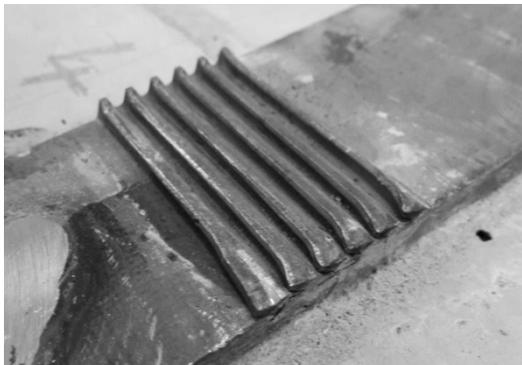
G-B2



G-B3



G-B4

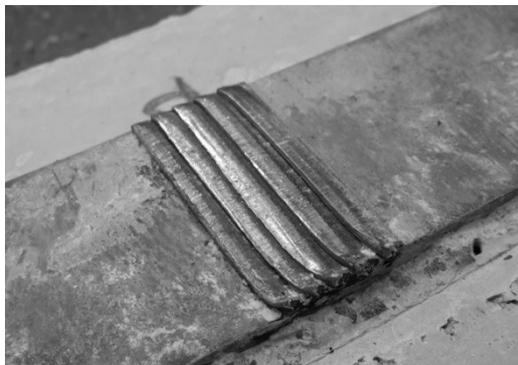


Knoten

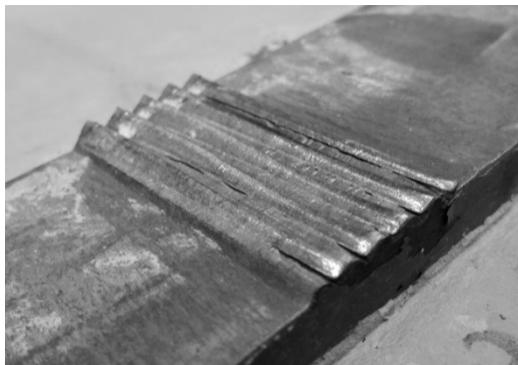
K-B1



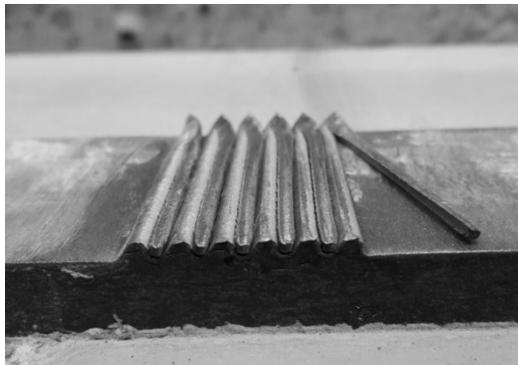
K-B2



K-B3



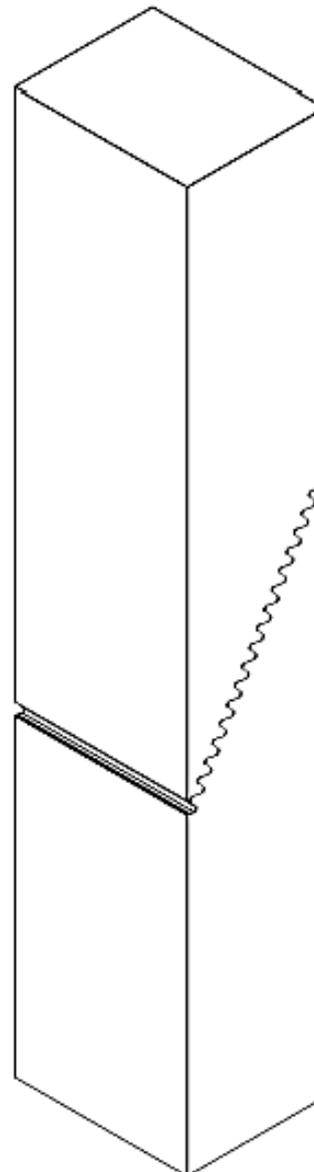
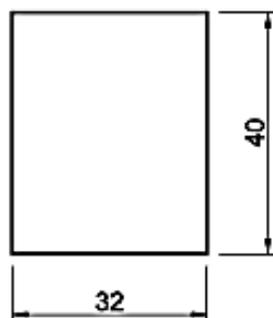
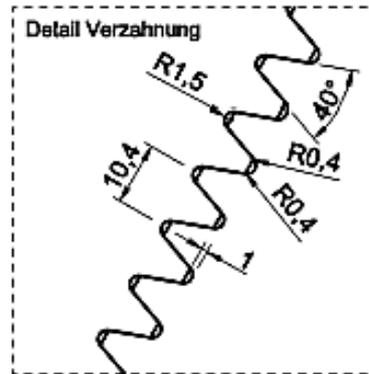
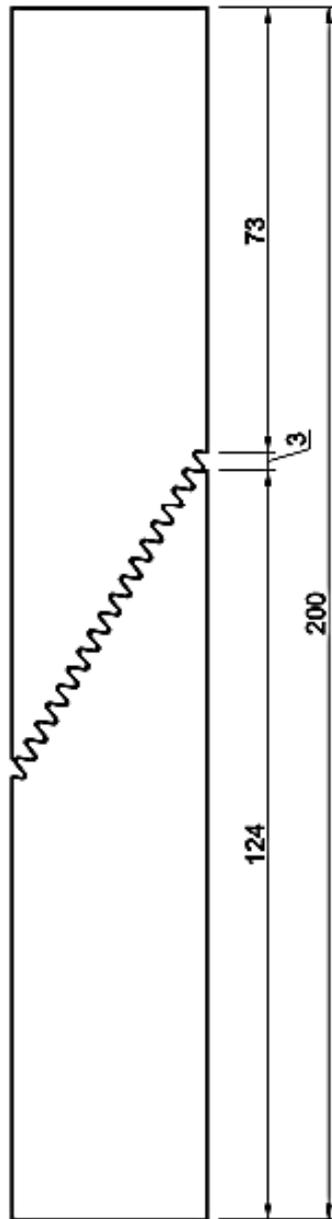
K-B4



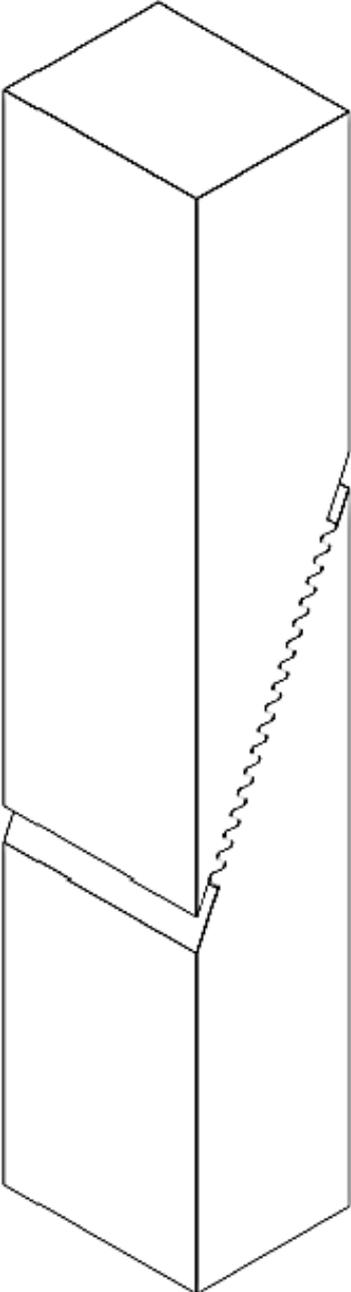
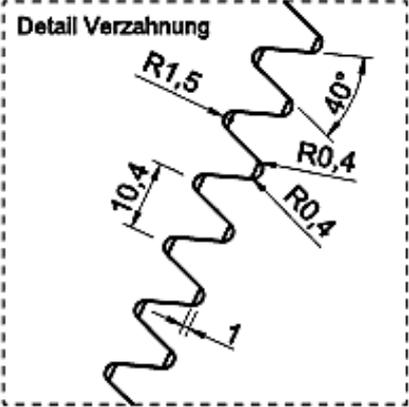
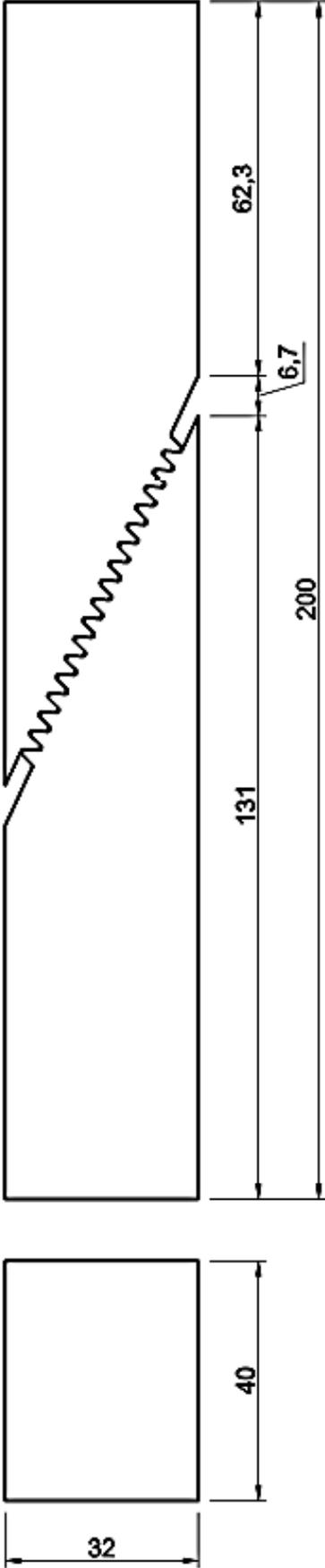
Anhang D: Pläne

Anhang D1: Pläne Prüfkörper Phase I

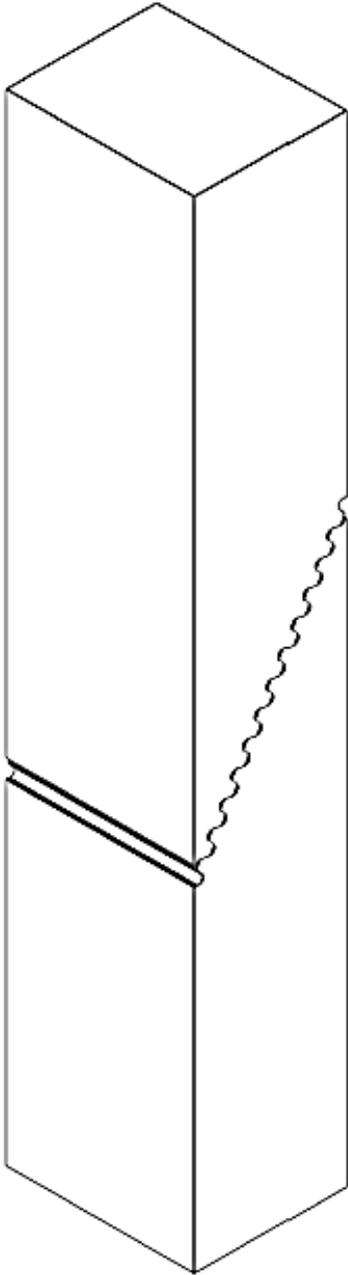
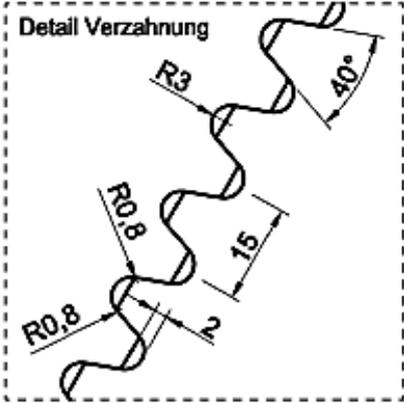
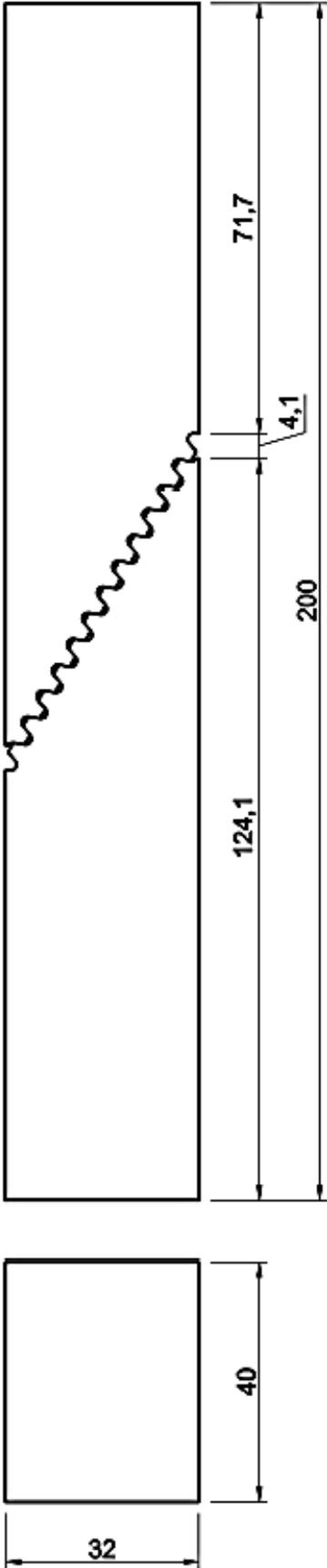
Kraftneigung 20° - Zähne $h_z=2,8\text{mm}$



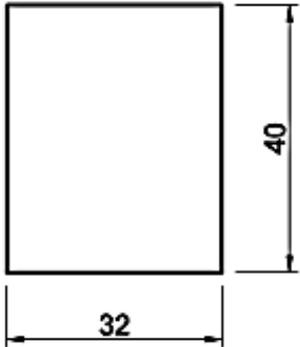
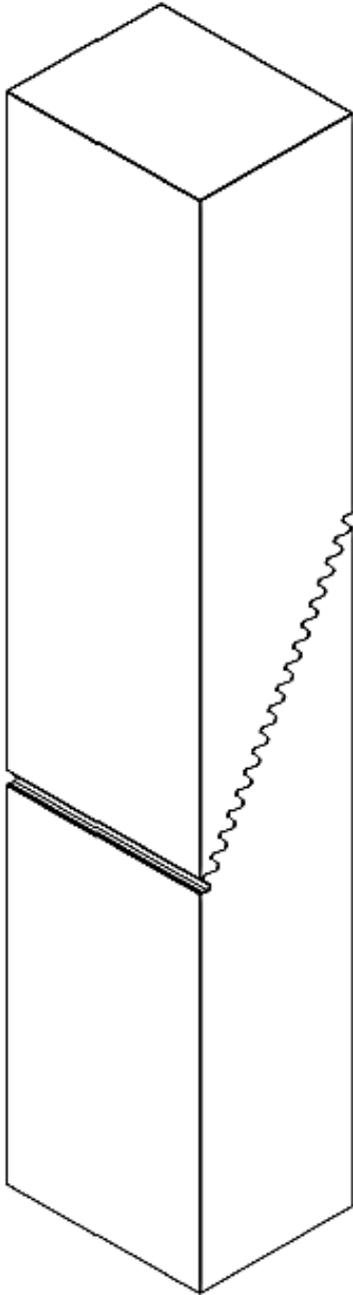
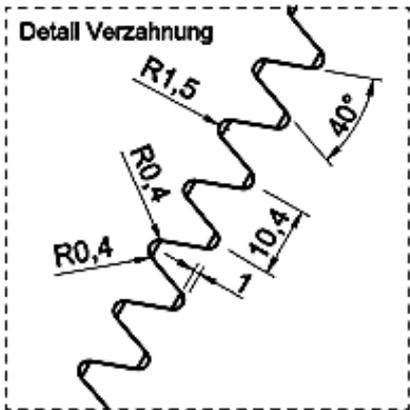
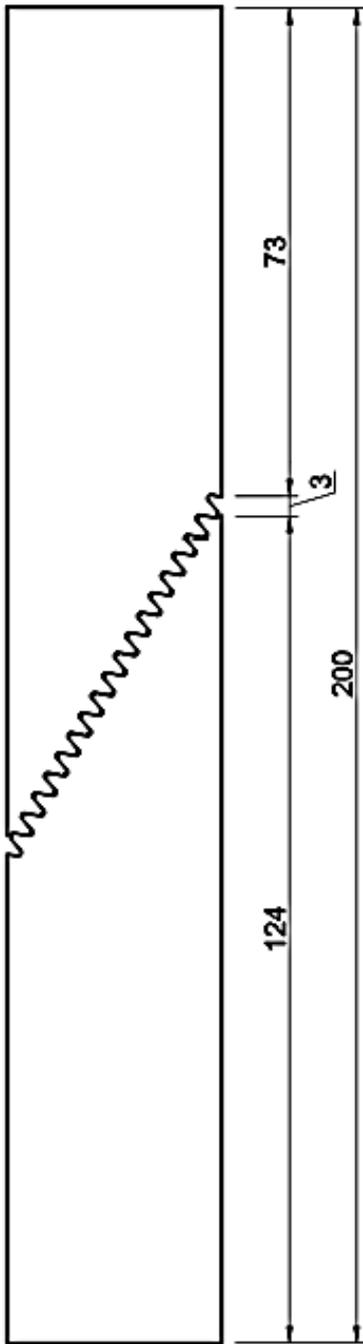
Kraftneigung 25° - Zähne $h_z=2,8\text{mm}$



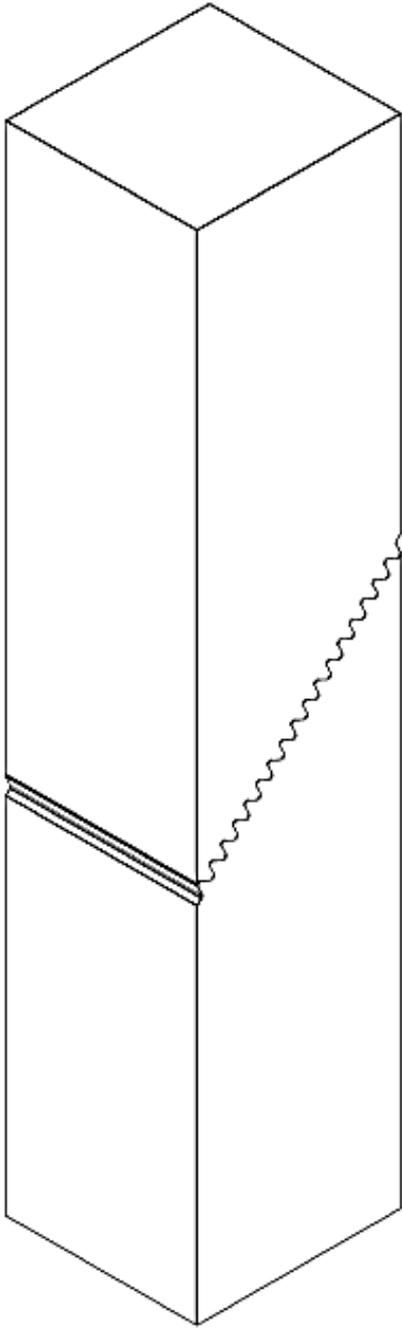
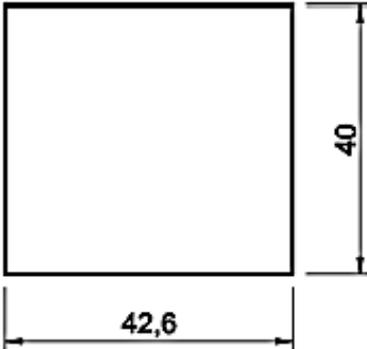
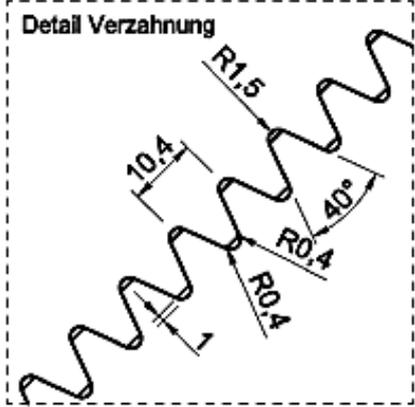
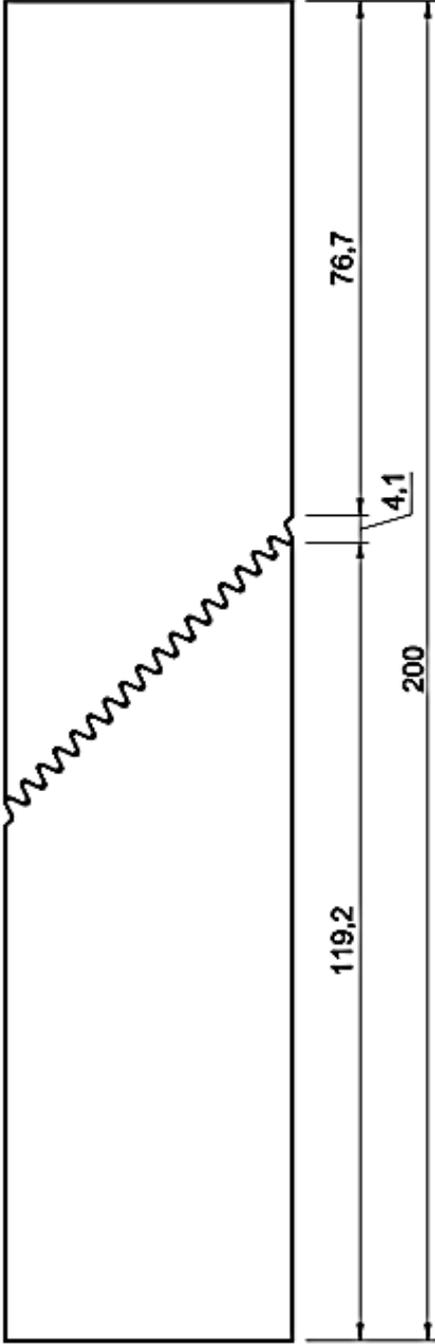
Kraftneigung 30° - Zähne $h_z=3,02\text{mm}$



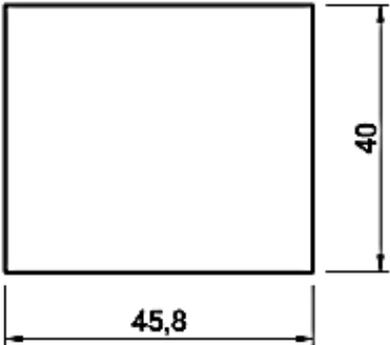
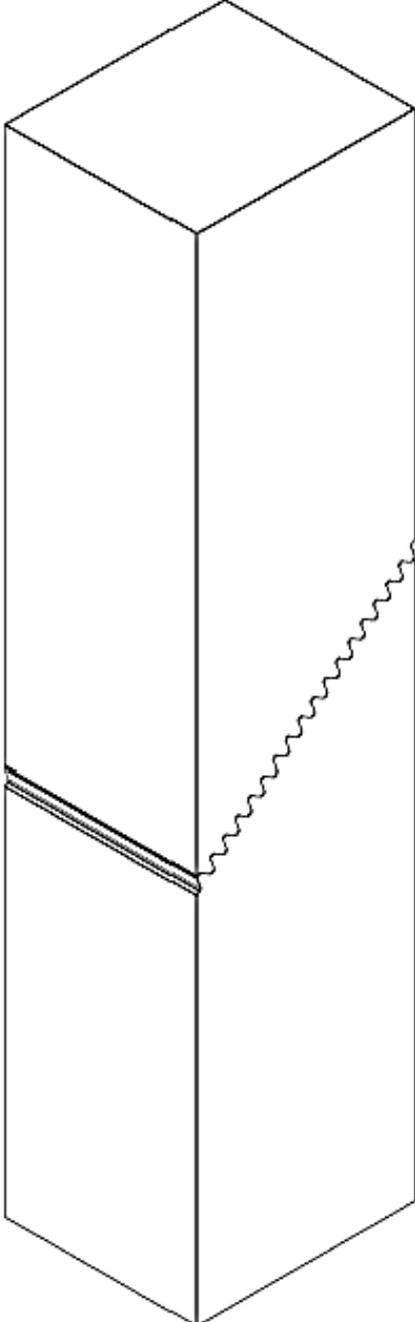
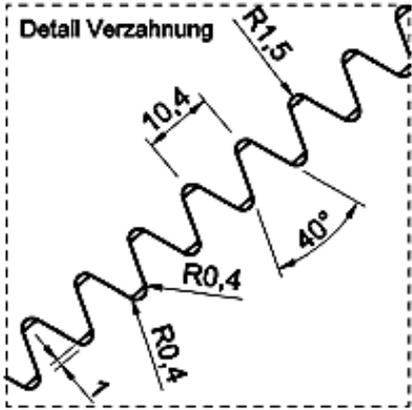
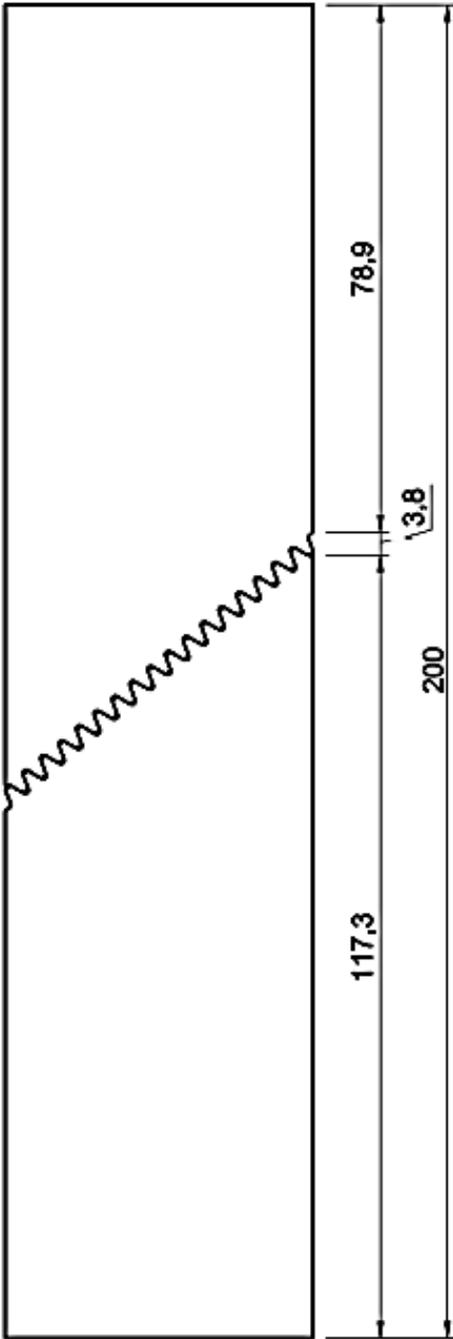
Kraftneigung 30° - Zähne $h_z=2,8\text{mm}$



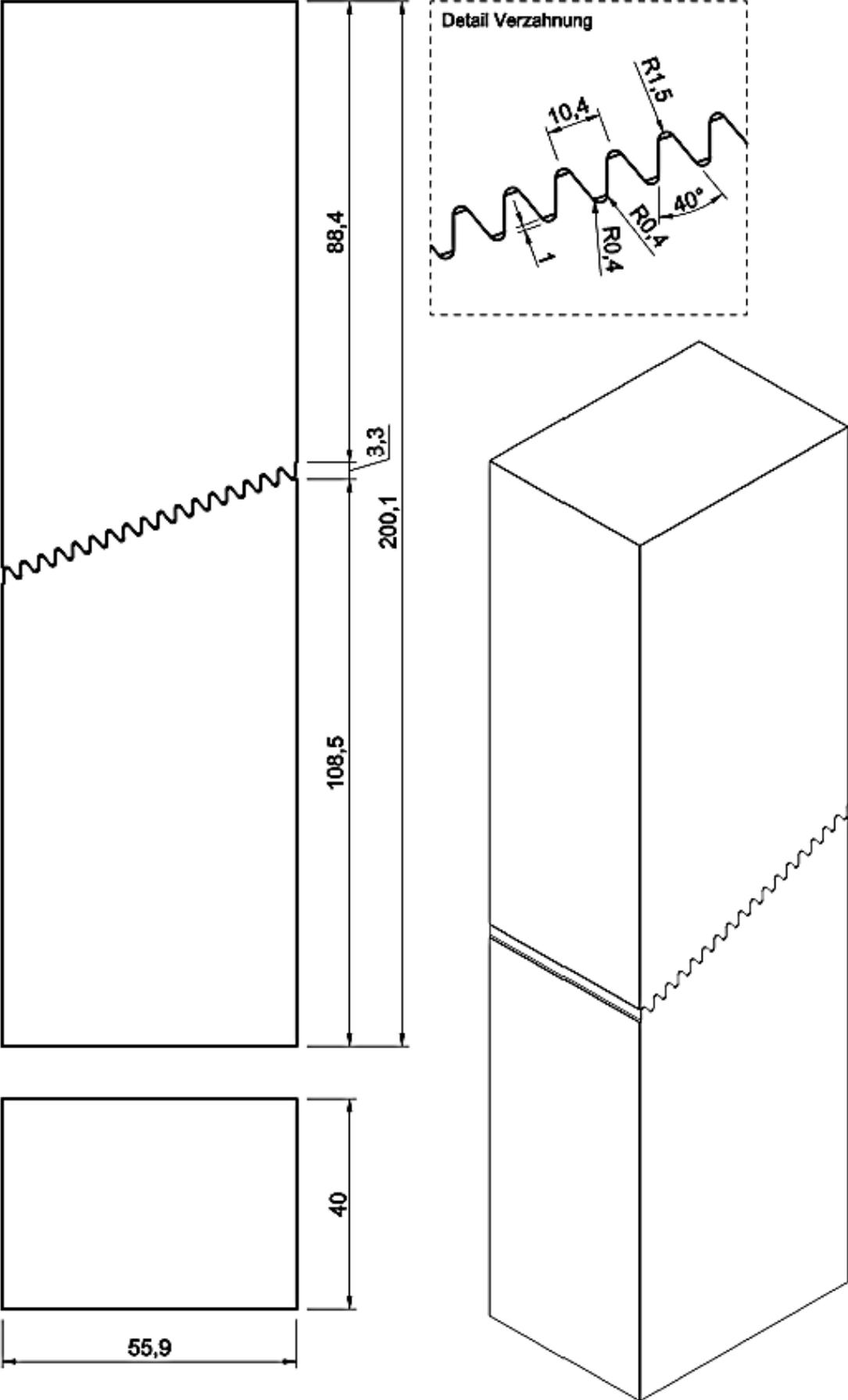
Kraftneigung 45° - Zähne $h_z=2,8\text{mm}$



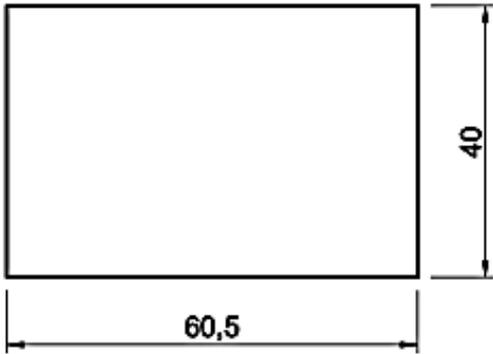
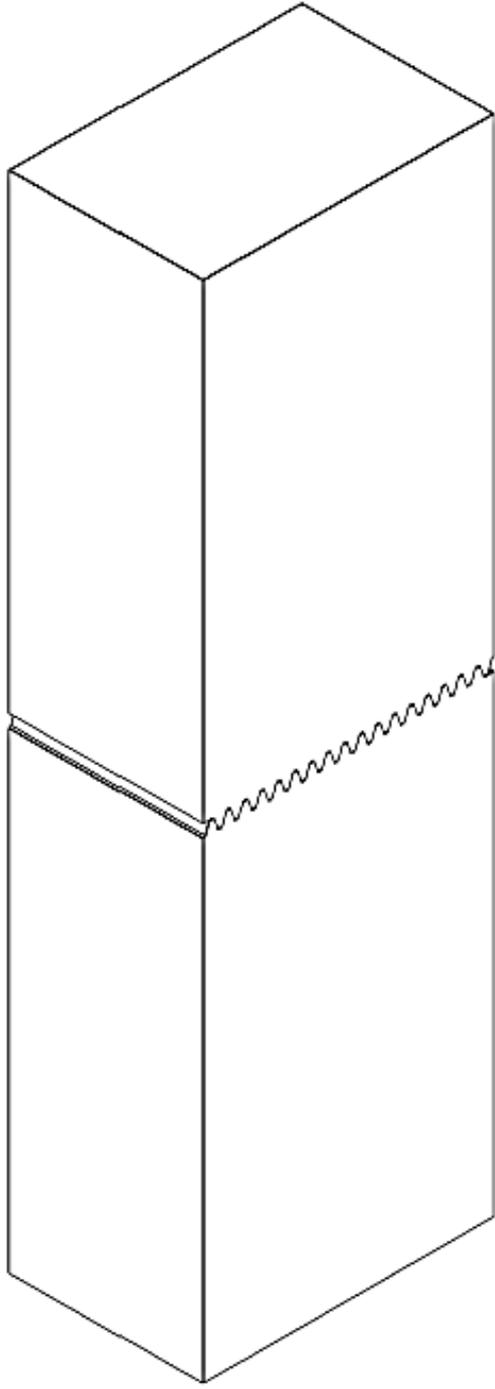
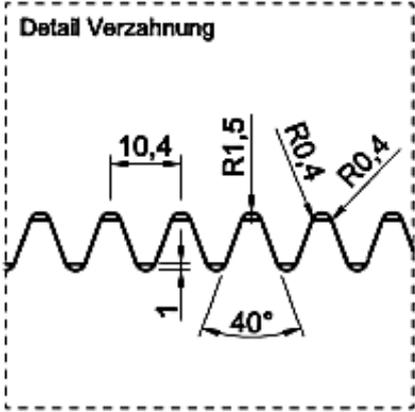
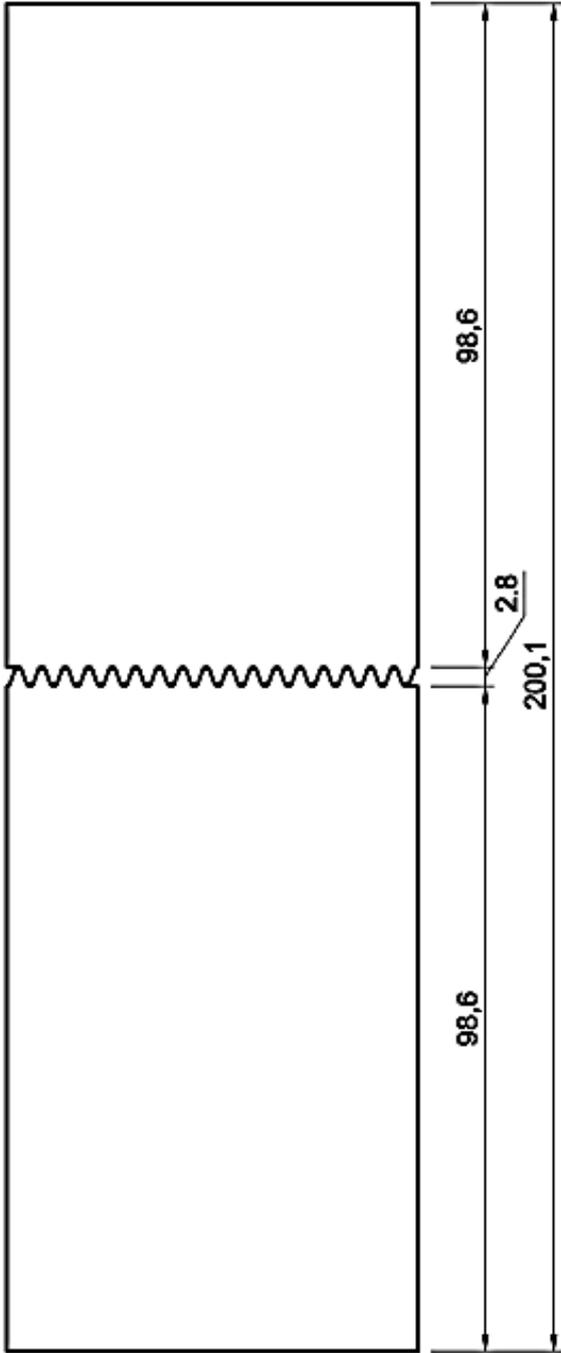
Kraftneigung 50° - Zähne $h_z=2,8\text{mm}$



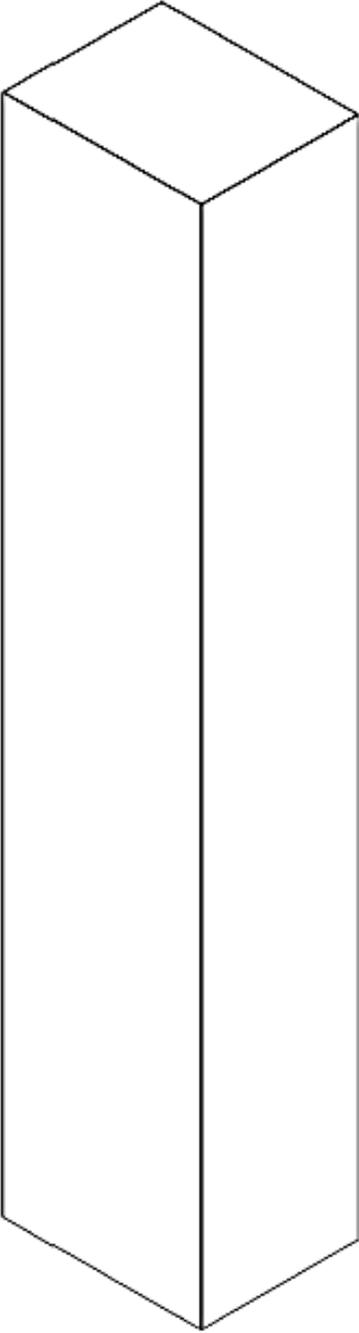
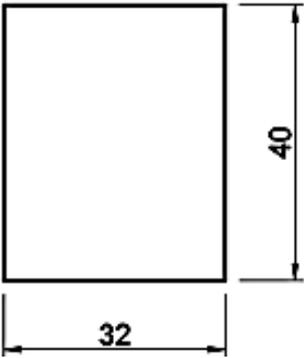
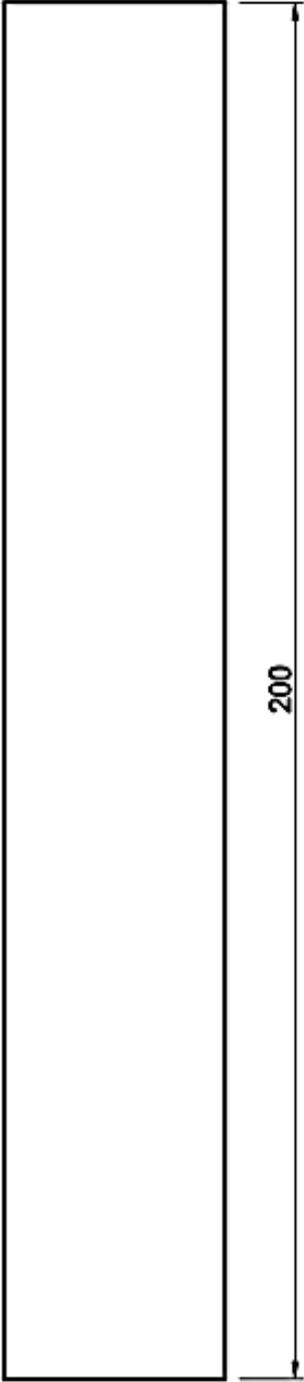
Kraftneigung 70° - Zähne $h_z=2,8\text{mm}$



Kraftneigung 90° - Zähne $h_z=2,8\text{mm}$

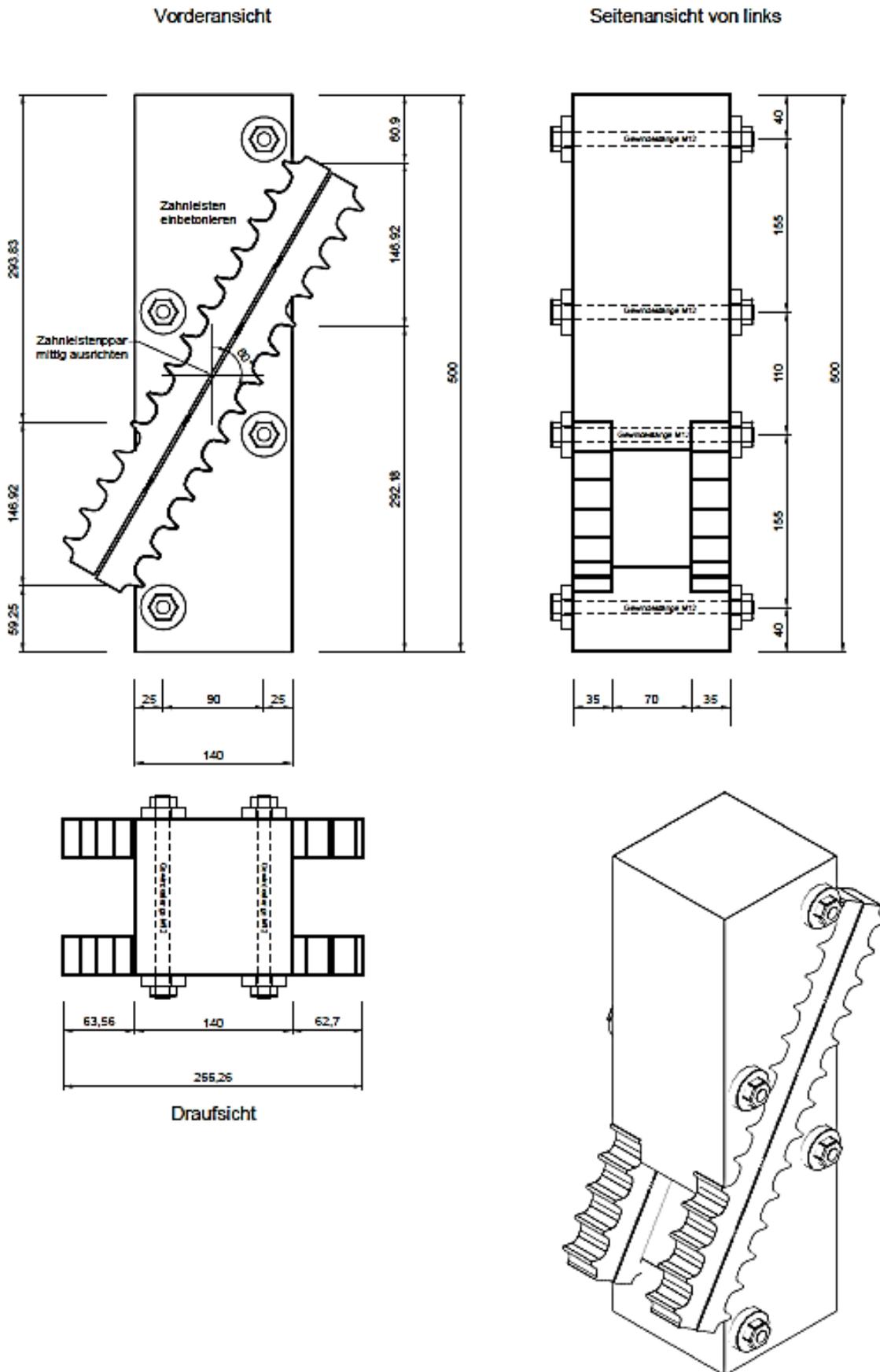


Referenzprüfkörper



Anhang D2: Pläne Prüfkörper Phase II

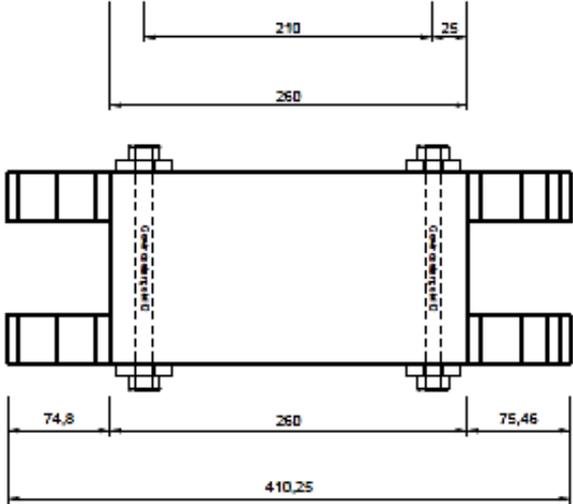
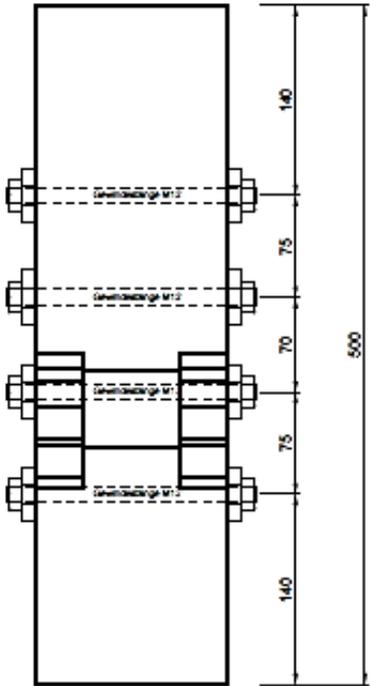
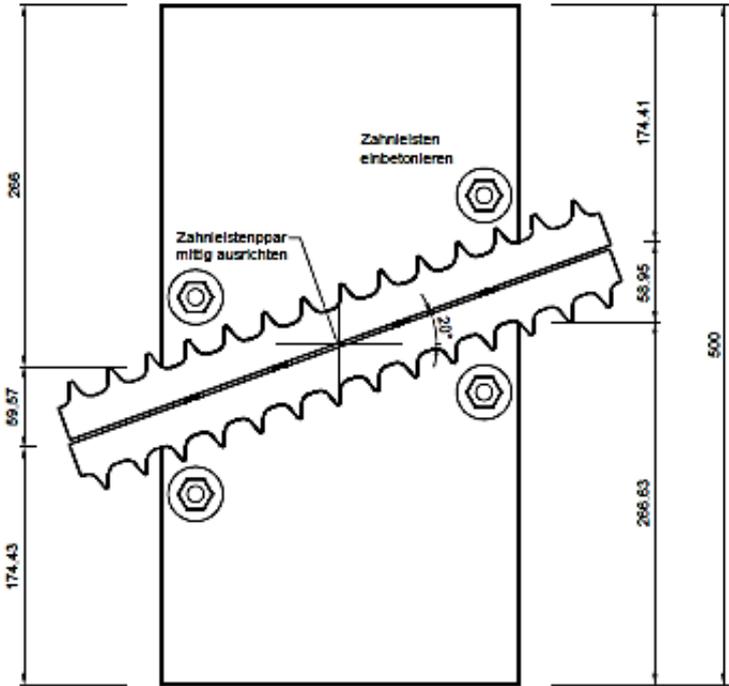
II/P1



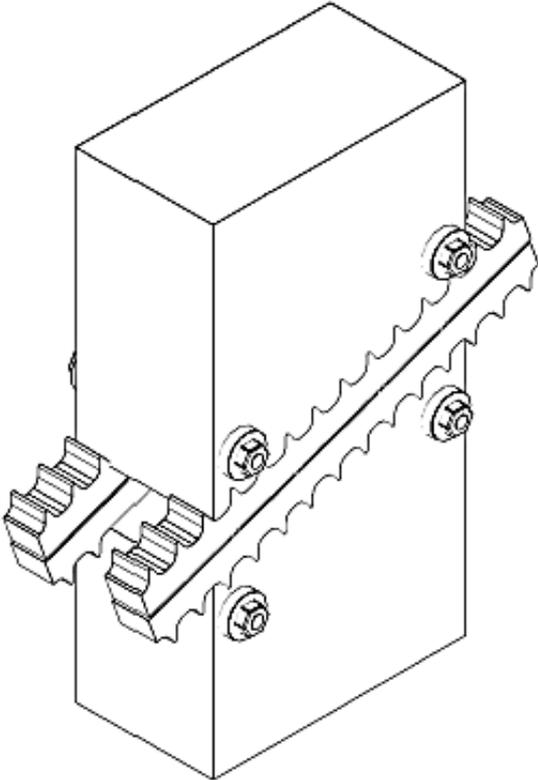
II/P2

Vorderansicht

Seitenansicht von links



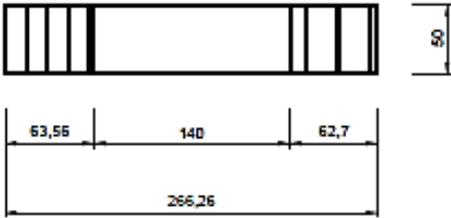
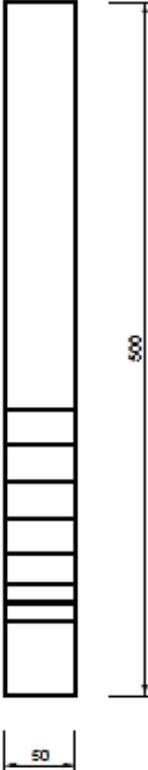
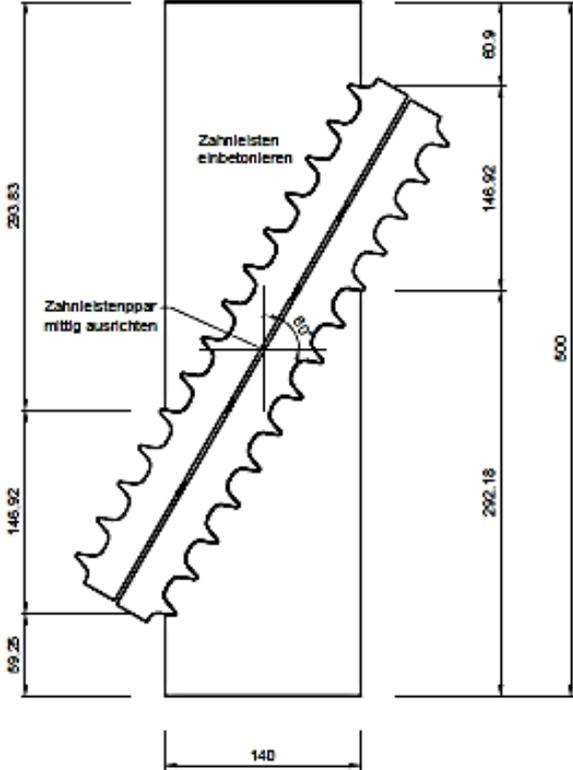
Draufsicht



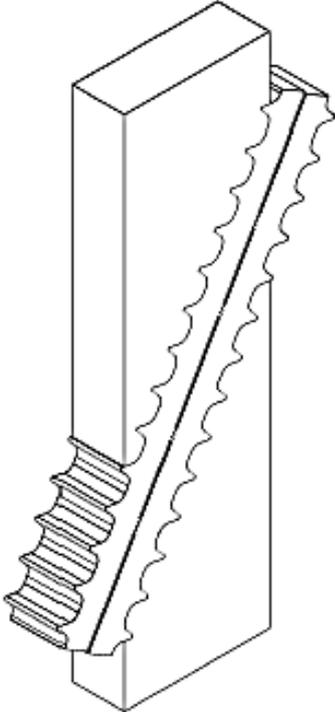
II/P3 und P4

Vorderansicht

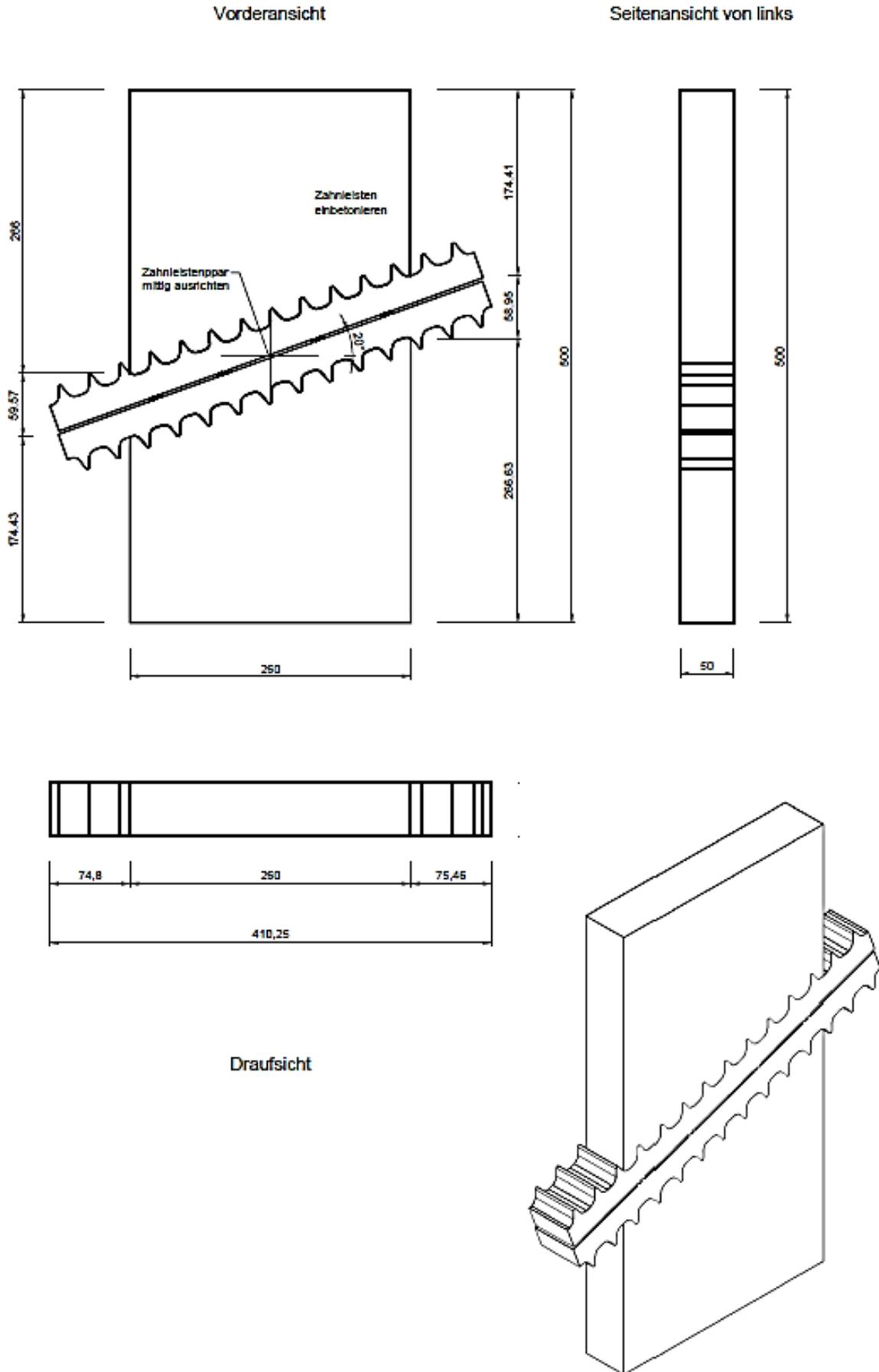
Seitenansicht von links



Draufsicht

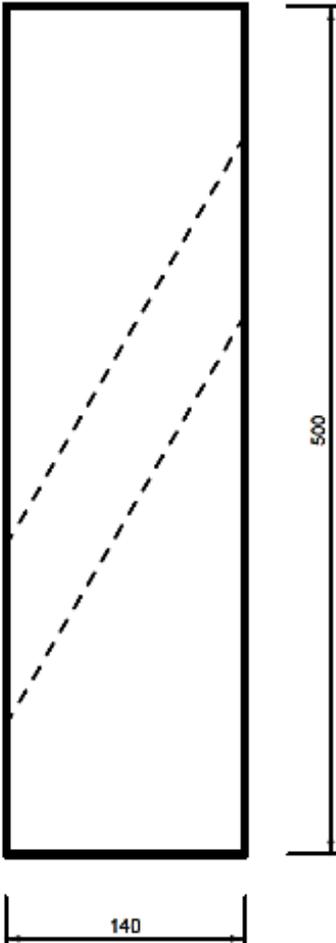


II/P5

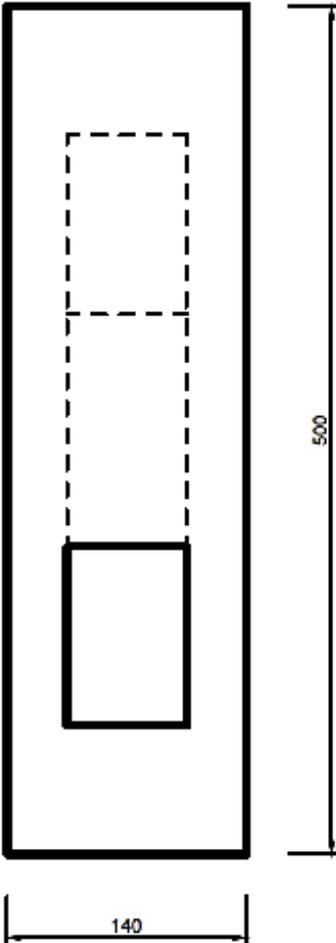


II/R1

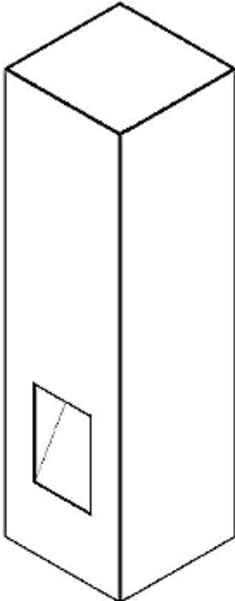
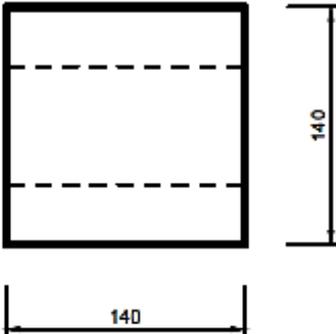
Vorderansicht



Seitenansicht von links

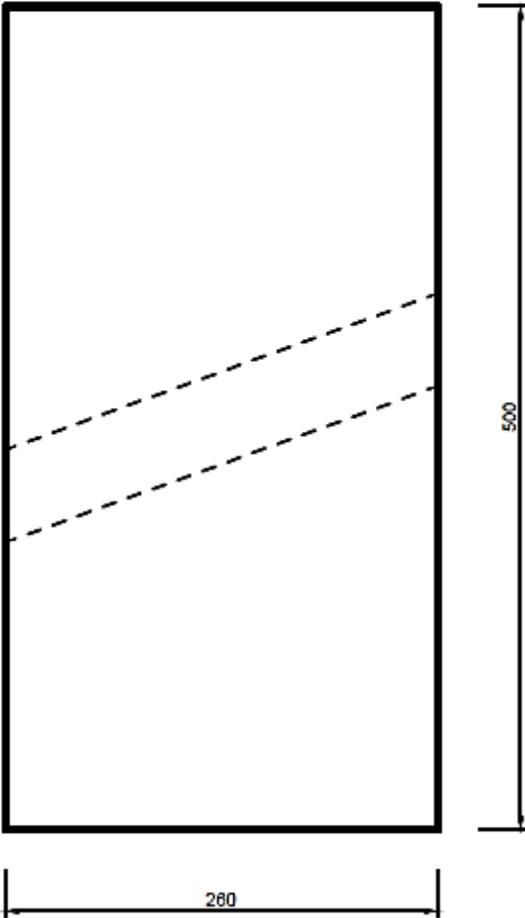


Draufsicht

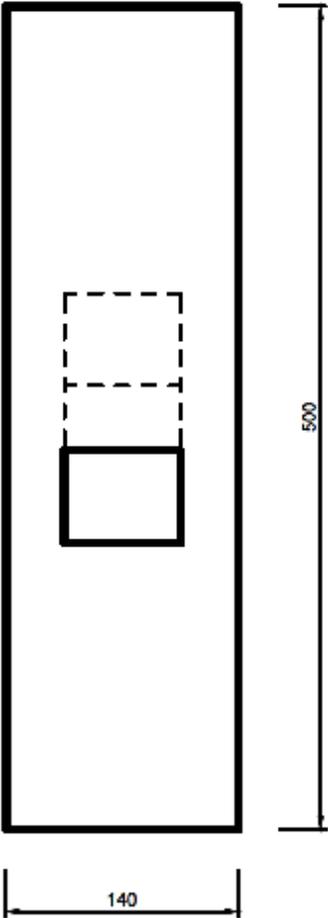


II/R2

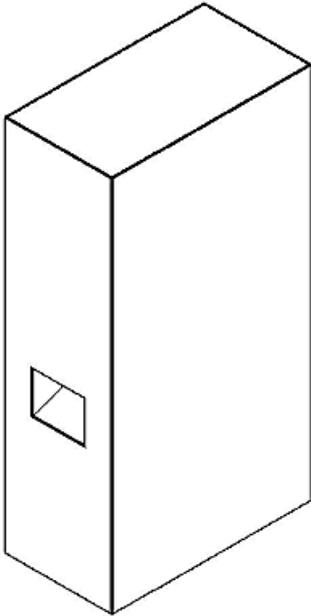
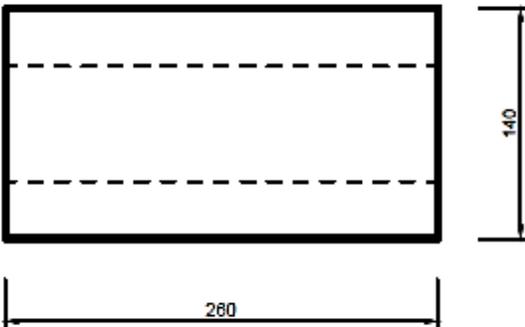
Vorderansicht



Seitenansicht von links

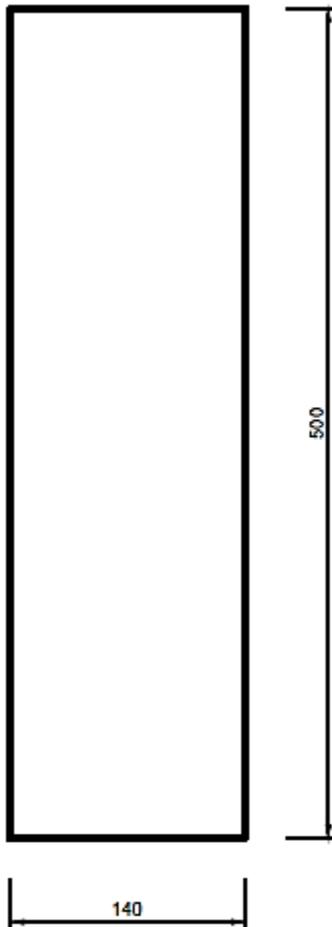


Draufsicht

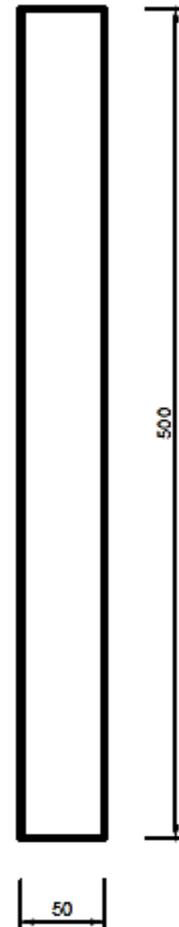


II/R3

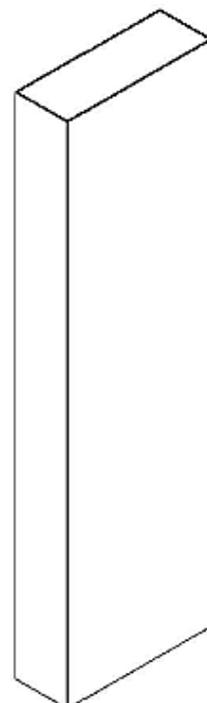
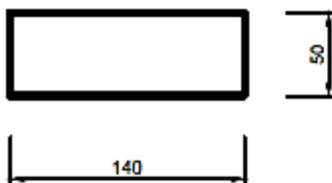
Vorderansicht



Seitenansicht von links

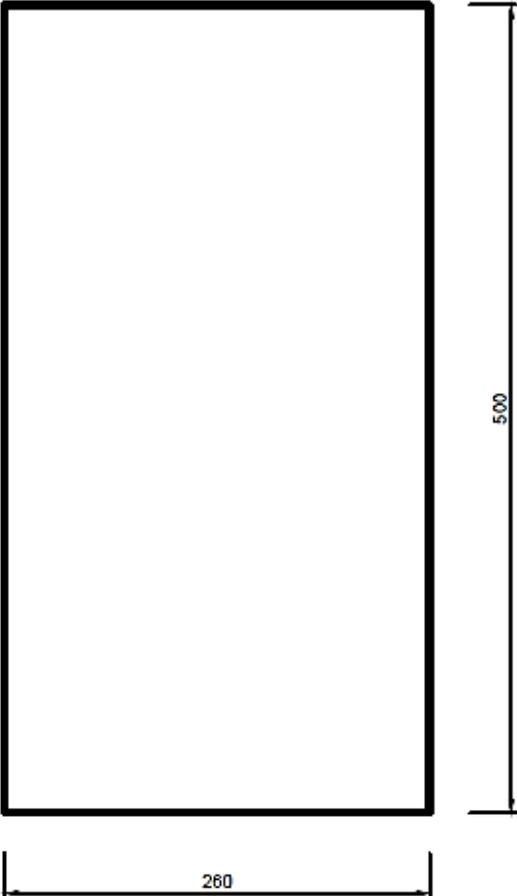


Draufsicht

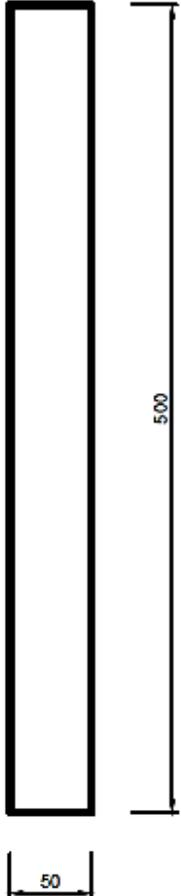


II/R4

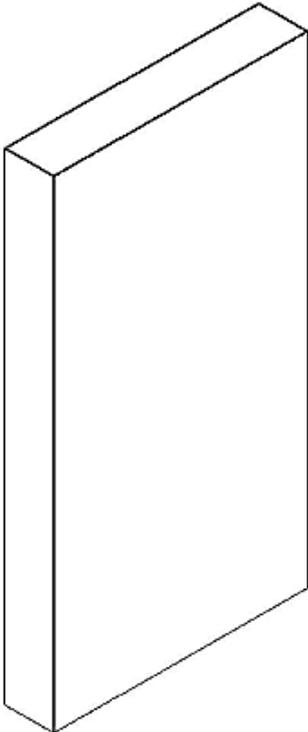
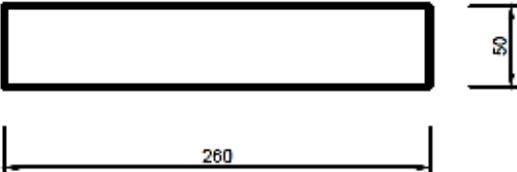
Vorderansicht



Seitenansicht von links



Draufsicht



Schal- und Bewehrungsplan Stütze für Konsolenelement, o. M.

Bewehrungsübersicht Stütze

Reinhaltebereich: 2,5 m von Bewehrungsbeginn
Reinhaltebereich: 2,5 m von Bewehrungsende

Reinhaltebereich: 2,5 m von Bewehrungsbeginn
Reinhaltebereich: 2,5 m von Bewehrungsende

Stabliste

Pos.	Stab	Einheit	Gesamt	Maße
		Länge	Stk	läng
1	12	1,25	12	5,83
2	12	1,25	12	5,83
3	12	1,25	12	5,83
4	12	1,25	12	5,83
5	12	1,25	12	5,83
6	12	1,25	12	5,83
7	12	1,25	12	5,83
8	12	1,25	12	5,83
9	12	1,25	12	5,83
10	12	1,25	12	5,83
11	12	1,25	12	5,83
12	12	1,25	12	5,83
13	12	1,25	12	5,83
14	12	1,25	12	5,83
15	12	1,25	12	5,83
16	12	1,25	12	5,83
17	12	1,25	12	5,83
18	12	1,25	12	5,83
19	12	1,25	12	5,83
20	12	1,25	12	5,83
21	12	1,25	12	5,83
22	12	1,25	12	5,83
23	12	1,25	12	5,83
24	12	1,25	12	5,83
25	12	1,25	12	5,83
26	12	1,25	12	5,83
27	12	1,25	12	5,83
28	12	1,25	12	5,83
29	12	1,25	12	5,83
30	12	1,25	12	5,83
31	12	1,25	12	5,83
32	12	1,25	12	5,83
33	12	1,25	12	5,83
34	12	1,25	12	5,83
35	12	1,25	12	5,83
36	12	1,25	12	5,83
37	12	1,25	12	5,83
38	12	1,25	12	5,83
39	12	1,25	12	5,83
40	12	1,25	12	5,83
41	12	1,25	12	5,83
42	12	1,25	12	5,83
43	12	1,25	12	5,83
44	12	1,25	12	5,83
45	12	1,25	12	5,83
46	12	1,25	12	5,83
47	12	1,25	12	5,83
48	12	1,25	12	5,83
49	12	1,25	12	5,83
50	12	1,25	12	5,83
51	12	1,25	12	5,83
52	12	1,25	12	5,83
53	12	1,25	12	5,83
54	12	1,25	12	5,83
55	12	1,25	12	5,83
56	12	1,25	12	5,83
57	12	1,25	12	5,83
58	12	1,25	12	5,83
59	12	1,25	12	5,83
60	12	1,25	12	5,83
61	12	1,25	12	5,83
62	12	1,25	12	5,83
63	12	1,25	12	5,83
64	12	1,25	12	5,83
65	12	1,25	12	5,83
66	12	1,25	12	5,83
67	12	1,25	12	5,83
68	12	1,25	12	5,83
69	12	1,25	12	5,83
70	12	1,25	12	5,83
71	12	1,25	12	5,83
72	12	1,25	12	5,83
73	12	1,25	12	5,83
74	12	1,25	12	5,83
75	12	1,25	12	5,83
76	12	1,25	12	5,83
77	12	1,25	12	5,83
78	12	1,25	12	5,83
79	12	1,25	12	5,83
80	12	1,25	12	5,83
81	12	1,25	12	5,83
82	12	1,25	12	5,83
83	12	1,25	12	5,83
84	12	1,25	12	5,83
85	12	1,25	12	5,83
86	12	1,25	12	5,83
87	12	1,25	12	5,83
88	12	1,25	12	5,83
89	12	1,25	12	5,83
90	12	1,25	12	5,83
91	12	1,25	12	5,83
92	12	1,25	12	5,83
93	12	1,25	12	5,83
94	12	1,25	12	5,83
95	12	1,25	12	5,83
96	12	1,25	12	5,83
97	12	1,25	12	5,83
98	12	1,25	12	5,83
99	12	1,25	12	5,83
100	12	1,25	12	5,83

6 x herstellen

BIEGEN VON BETONSTÄHLEN NACH DIN EN 10261-1 (EC2)

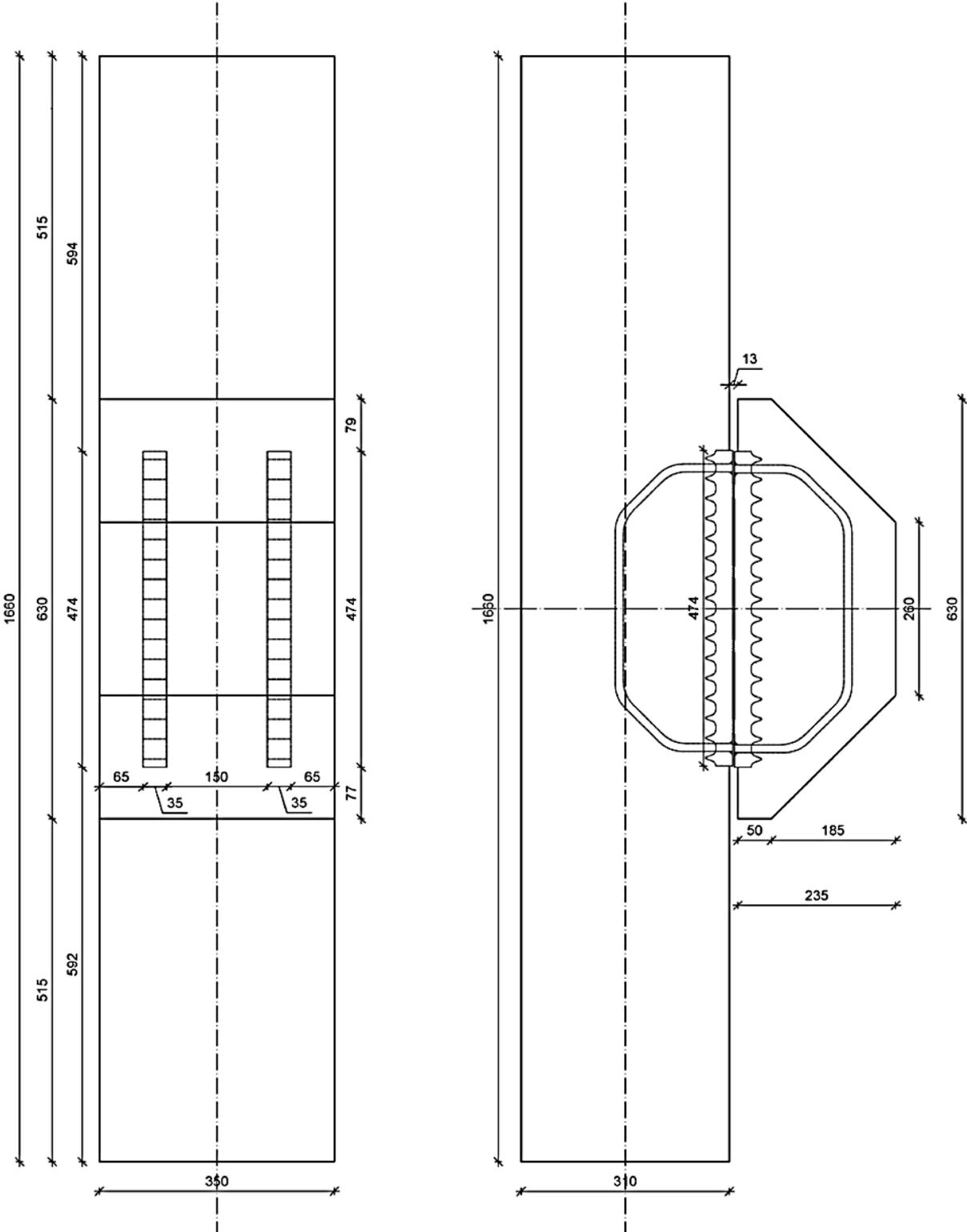
A) Biegeplan zur Krümmung

B) Krümmungsbewehrung

Einbauteile

Pos.	Stab	Einheit	Gesamt	Maße
1	12	1,25	12	5,83
2	12	1,25	12	5,83
3	12	1,25	12	5,83
4	12	1,25	12	5,83
5	12	1,25	12	5,83
6	12	1,25	12	5,83
7	12	1,25	12	5,83
8	12	1,25	12	5,83
9	12	1,25	12	5,83
10	12	1,25	12	5,83
11	12	1,25	12	5,83
12	12	1,25	12	5,83
13	12	1,25	12	5,83
14	12	1,25	12	5,83
15	12	1,25	12	5,83
16	12	1,25	12	5,83
17	12	1,25	12	5,83
18	12	1,25	12	5,83
19	12	1,25	12	5,83
20	12	1,25	12	5,83
21	12	1,25	12	5,83
22	12	1,25	12	5,83
23	12	1,25	12	5,83
24	12	1,25	12	5,83
25	12	1,25	12	5,83
26	12	1,25	12	5,83
27	12	1,25	12	5,83
28	12	1,25	12	5,83
29	12	1,25	12	5,83
30	12	1,25	12	5,83
31	12	1,25	12	5,83
32	12	1,25	12	5,83
33	12	1,25	12	5,83
34	12	1,25	12	5,83
35	12	1,25	12	5,83
36	12	1,25	12	5,83
37	12	1,25	12	5,83
38	12	1,25	12	5,83
39	12	1,25	12	5,83
40	12	1,25	12	5,83
41	12	1,25	12	5,83
42	12	1,25	12	5,83
43	12	1,25	12	5,83
44	12	1,25	12	5,83
45	12	1,25	12	5,83
46	12	1,25	12	5,83
47	12	1,25	12	5,83
48	12	1,25	12	5,83
49	12	1,25	12	5,83
50	12	1,25	12	5,83
51	12	1,25	12	5,83
52	12	1,25	12	5,83
53	12	1,25	12	5,83
54	12	1,25	12	5,83
55	12	1,25	12	5,83
56	12	1,25	12	5,83
57	12	1,25	12	5,83
58	12	1,25	12	5,83
59	12	1,25	12	5,83
60	12	1,25	12	5,83
61	12	1,25	12	5,83
62	12	1,25	12	5,83
63	12	1,25	12	5,83
64	12	1,25	12	5,83
65	12	1,25	12	5,83
66	12	1,25	12	5,83
67	12	1,25	12	5,83
68	12	1,25	12	5,83
69	12	1,25	12	5,83
70	12	1,25	12	5,83
71	12	1,25	12	5,83
72	12	1,25	12	5,83
73	12	1,25	12	5,83
74	12	1,25	12	5,83
75	12	1,25	12	5,83
76	12	1,25	12	5,83
77	12	1,25	12	5,83
78	12	1,25	12	5,83
79	12	1,25	12	5,83
80	12	1,25	12	5,83
81	12	1,25	12	5,83
82	12	1,25	12	5,83
83	12	1,25	12	5,83
84	12	1,25	12	5,83
85	12	1,25	12	5,83
86	12	1,25	12	5,83
87	12	1,25	12	5,83
88	12	1,25	12	5,83
89	12	1,25	12	5,83
90	12	1,25	12	5,83
91	12	1,25	12	5,83
92	12	1,25	12	5,83
93	12	1,25	12	5,83
94	12	1,25	12	5,83
95	12	1,25	12	5,83
96	12	1,25	12	5,83
97	12	1,25	12	5,83
98	12	1,25	12	5,83
99	12	1,25	12	5,83
100	12	1,25	12	5,83

Ausschnitt Gurt und Knotenelement



Schal- und Bewehrungsplan Pfosten/Diagonale für FWT-Knotenelement, o. M.

BIEGEN VON BETONSTÄHLEN NACH DIN EN 1922-1-1 (EC2)

Bei der Bestimmung des Biegequerdurchmessers D ist DIN EN 1922-1-1NA, Tabelle NA.6, 1a zu beachten und nach der bautechnischen Funktion der Biegung zu unterscheiden.

A) Biegungen zur Kraftumleitung

Mindestwerte der Bewehrung nach DIN EN 1922-1-1NA, Tabelle NA.6, 1a zu beachten

Mindestwerte der Bewehrung nach DIN EN 1922-1-1NA, Tabelle NA.6, 1a zu beachten	Biegequerdurchmesser D (mm)
$> 100\text{mm}$ und $> 7\phi$	$\min D = 10\phi$
$> 50\text{mm}$ und $> 3\phi$	$\min D = 15\phi$
$\leq 50\text{mm}$ oder $\leq 3\phi$	$\min D = 20\phi$

Biegungen nach A)

Zur Herstellung und Überprüfung ist der erforderliche Biegequerdurchmesser D an der Biegestelle im Bewehrungsplan und auf der Stabliste anzugeben.

B) Konstruktive Biegungen

Mindestwerte der Bewehrung nach DIN EN 1922-1-1NA, Tabelle NA.6, 1a zu beachten	Biegequerdurchmesser D (mm)
6, 8, 10, 12	$\min D = 40\text{mm}$
14, 16	$\min D = 64\text{mm}$
20, 25, 28	$\min D = 175\text{mm}$

Biegungen nach B)

Wird an der Biegestelle wieder in Bewehrungsplan nach auf der Stabliste ein Biegequerdurchmesser angegeben, so ist er D in Abhängigkeit des ϕ nager Tabelle zu entnehmen.

EINBAUTEILE

Position	Anzahl	Beschreibung	Summe
A	1	Hüllrohr $\phi 40\text{mm}$, $L=30\text{cm}$	4

Anmerkung: "Summe" = Anzahl der Einbauteile x 1 (Stückzahl der FT-Element)

[Die jeweiligen Herstellervorschriften bezüglich Einbau, Zulagebewehrung etc. sind unbedingt einzuhalten!]

Betonoberflächen Schalenseite:	Betonoberflächen Einbauseite
<ul style="list-style-type: none"> Schalungsglat Keine besond. Anforderungen Aufgeraut W/Schablon, Struktur 	<ul style="list-style-type: none"> Handgeglättet Sauber abgeben Aufgeraut Besenslicht

Betonmischklassen: C100/115

Zahnleisten: 4,0cm

[XC1]

Statische Position: Letzte Stabstahlposition

Summe B500A: 2

Fläche: -

Volumen: -

Gewicht: 3,61 kg

Draufsicht

Hüllrohr, $d=4\text{cm}$, $L=30\text{cm}$

4 x herstellen

Seitenansicht

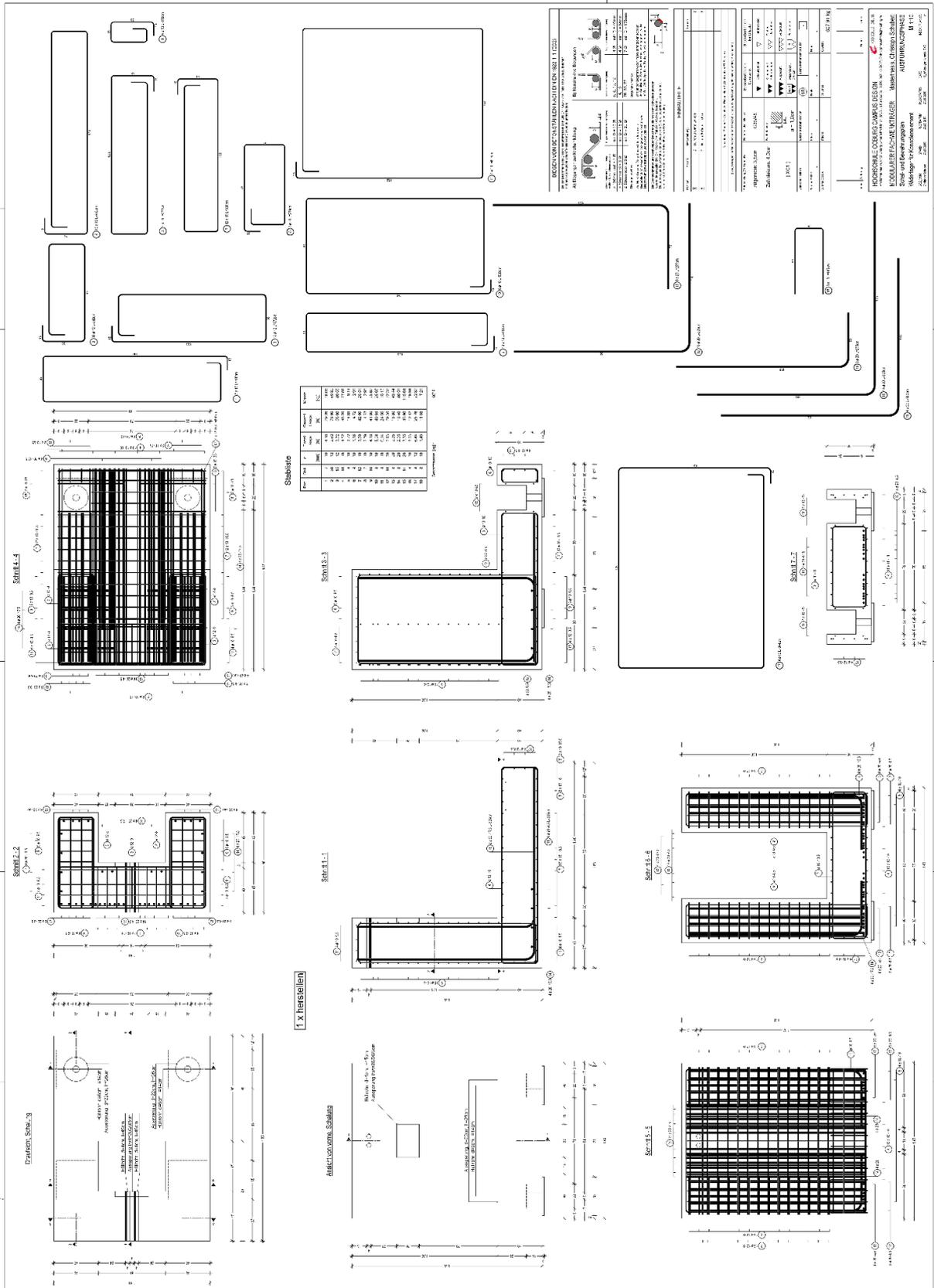
Hüllrohr, $d=4\text{cm}$, $L=30\text{cm}$

Stabliste

Pos.	Stück	ϕ (mm)	Einzel Länge (m)	Gesamt Länge (m)	Masse (kg)
1	5	10	0.70	3.50	2.16
2	4	16	0.23	0.92	1.45
Gesamtmasse [kg]:					3,61

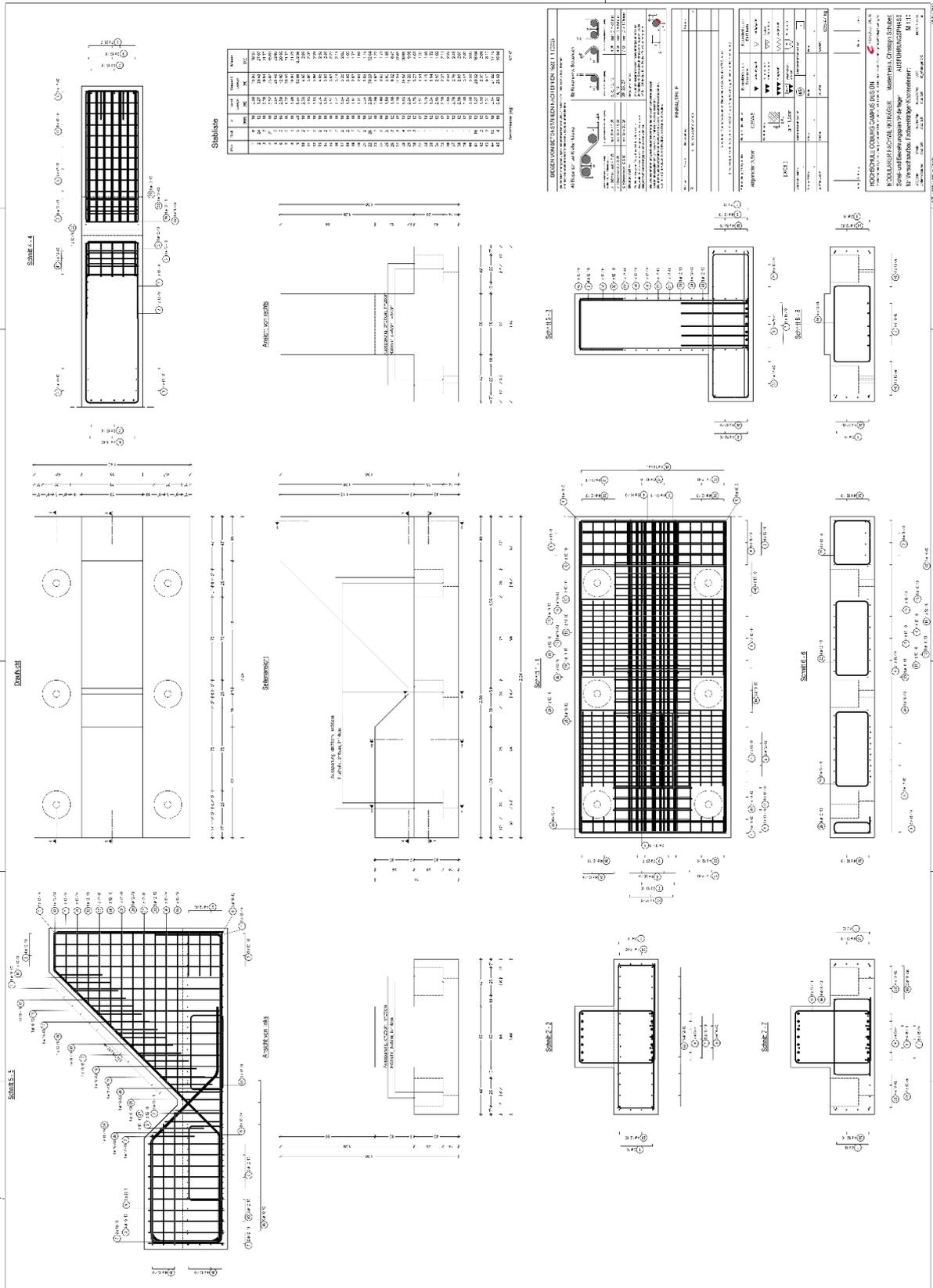
Anhang D5: Pläne Widerlager für Phase III

Schal- und Bewehrungsplan Widerlager für Konsolenelement, o. M.



Anhang D6: Pläne Widerlager Phase IV

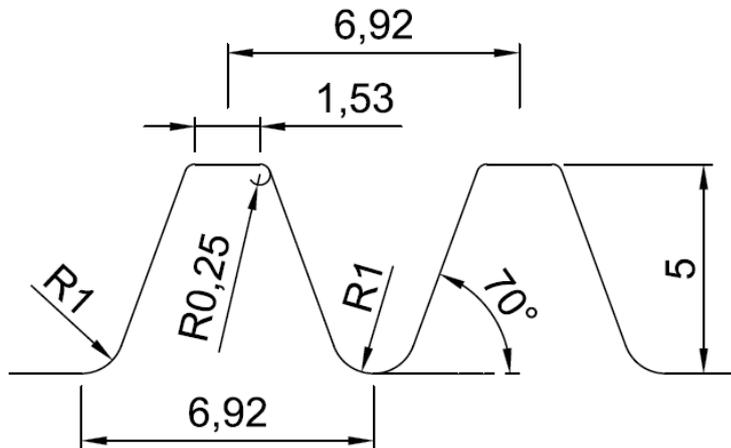
Schal- und Bewehrungsplan Widerlager für FWT-Knotenelement, o. M.



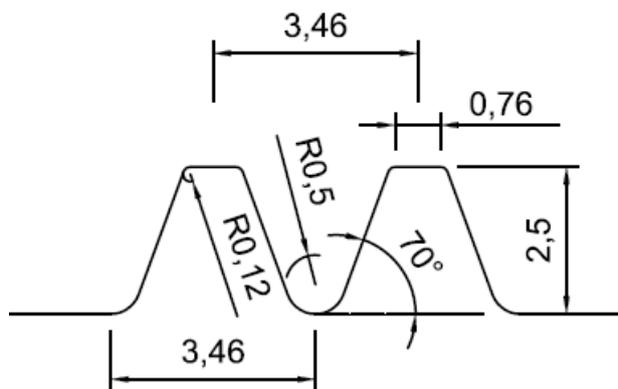
Anhang D7: Zahngeometrie

Phase I (Feine Stahlverzahnung)

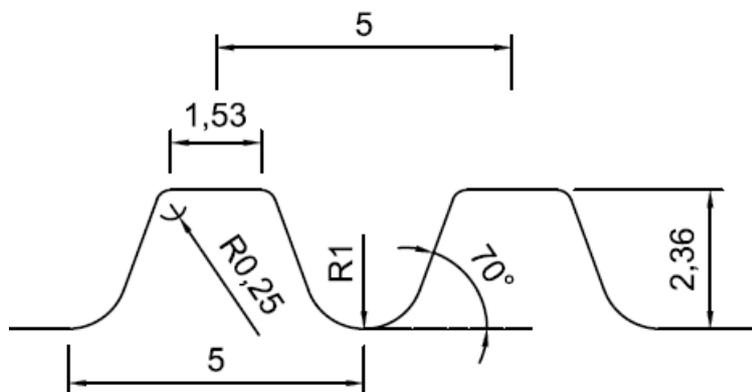
Geometrie 3 eingesetzt in: Prototyp; Phase III/V6



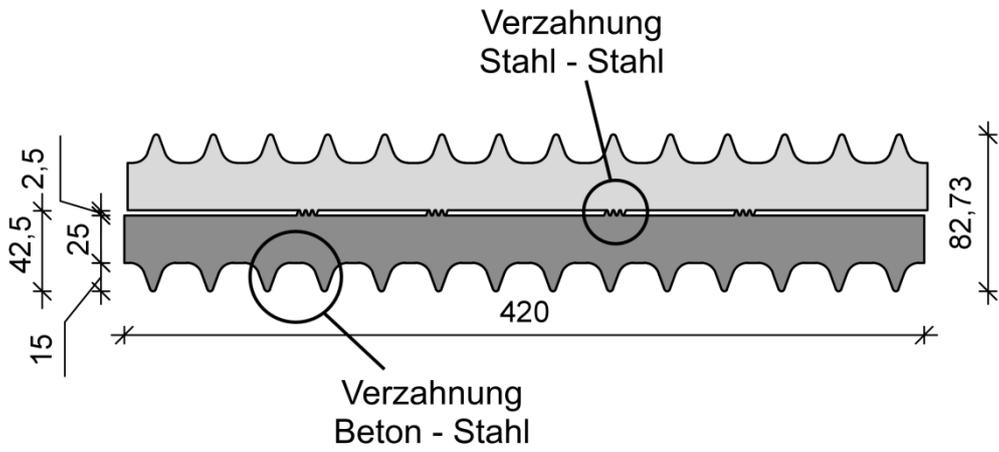
Geometrie 5 eingesetzt in: Phase I/P1-P2 u. P5-P14; Phase II; Phase III/V1-V5; Phase IV



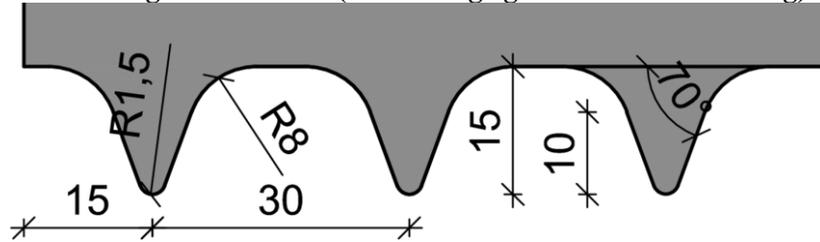
Geometrie 7 eingesetzt in: Phase I/P3 u. P4



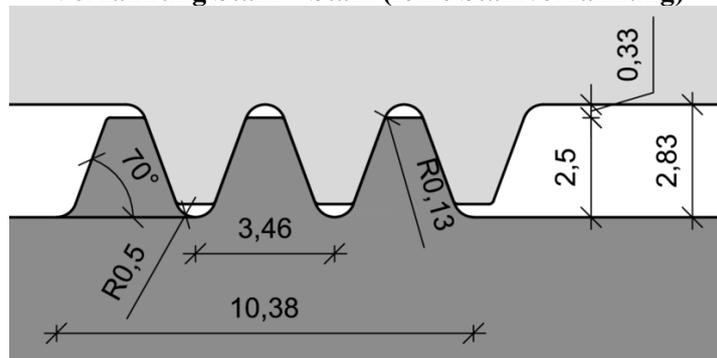
Phase II



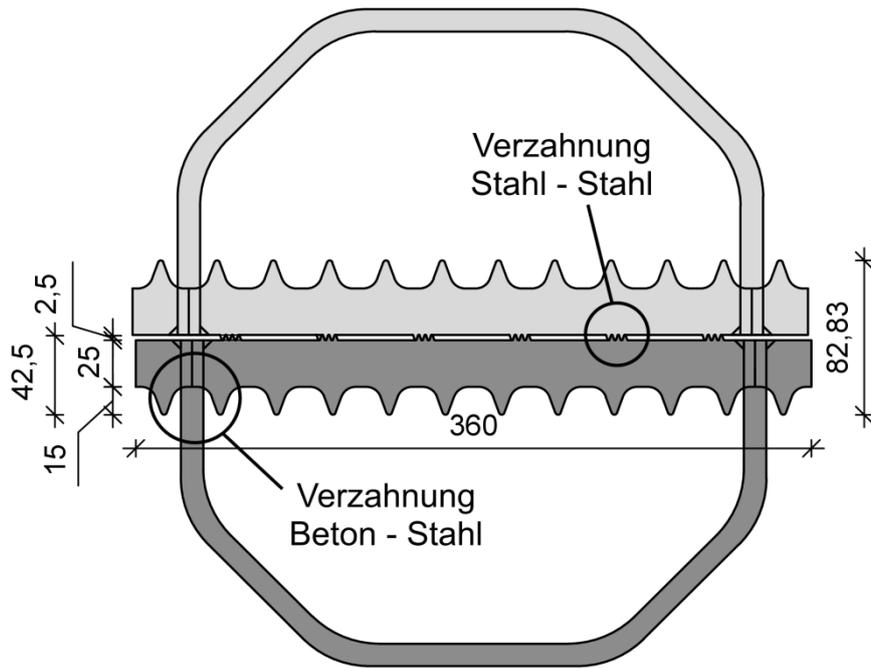
Verzahnung Beton - Stahl (betonseitige große Stahlverzahnung)



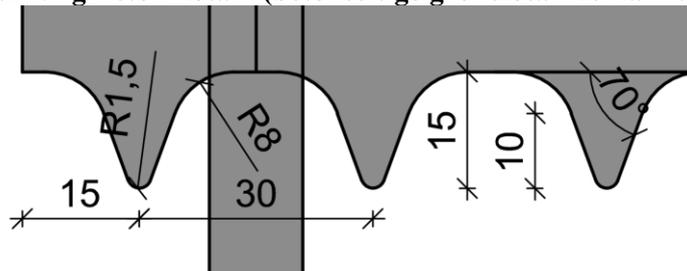
Verzahnung Stahl - Stahl (feine Stahlverzahnung)



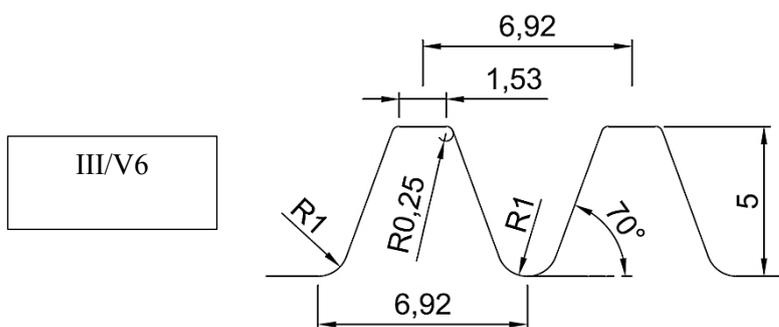
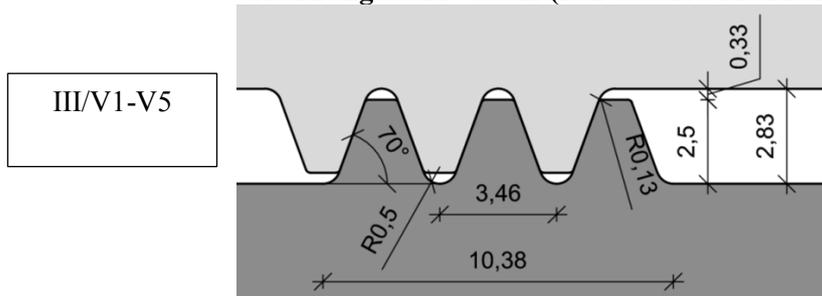
Phase III



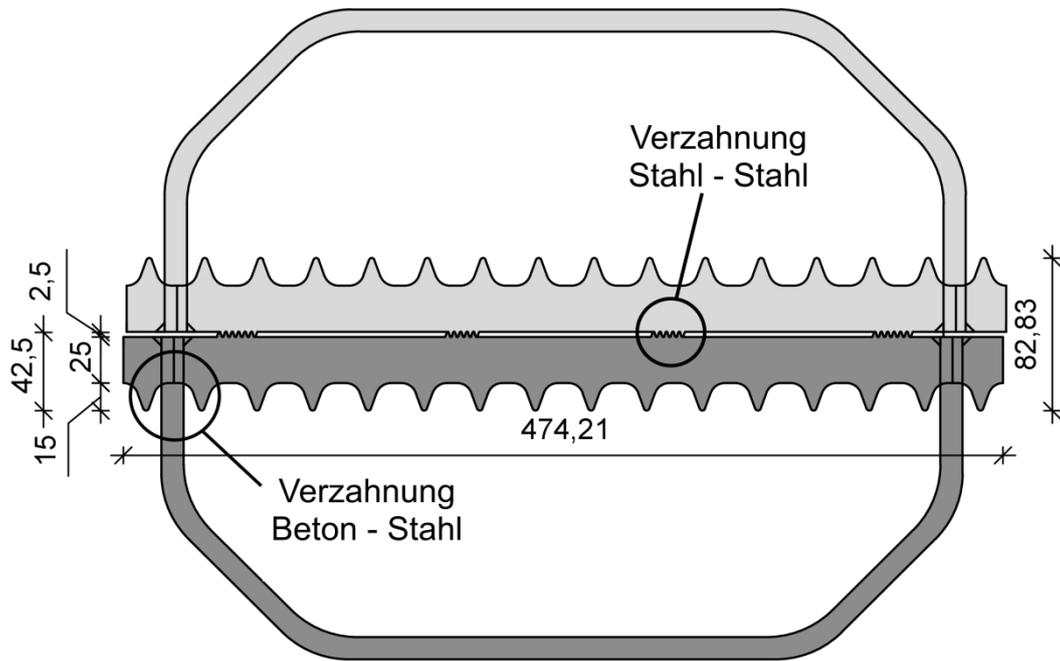
Verzahnung Beton - Stahl (betonseitige große Stahlverzahnung)



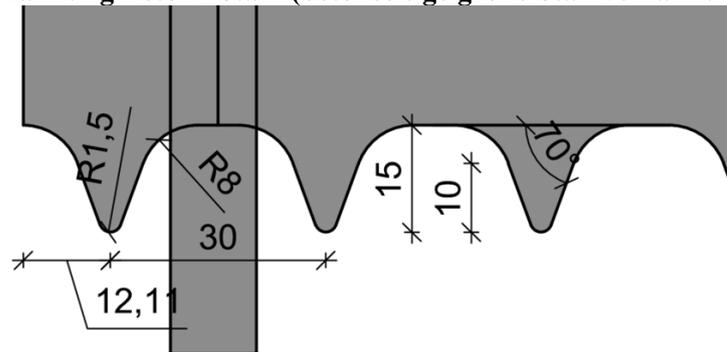
Verzahnung Stahl - Stahl (feine Stahlverzahnung)



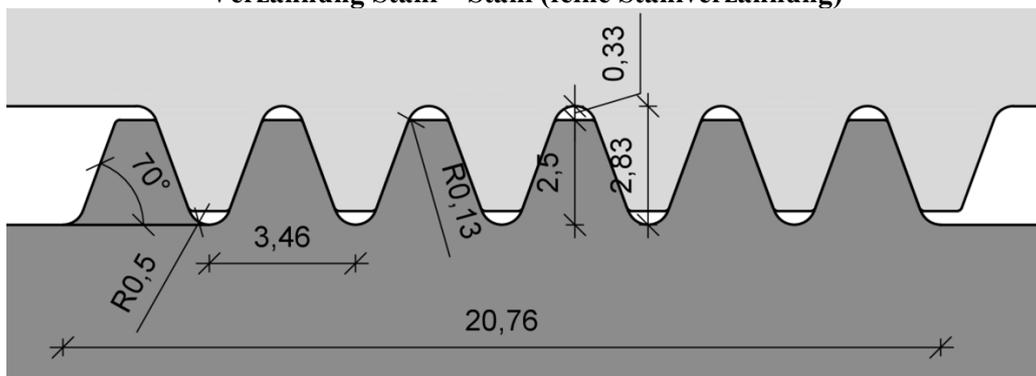
Phase IV



Verzahnung Beton - Stahl (betonseitige große Stahlverzahnung)



Verzahnung Stahl - Stahl (feine Stahlverzahnung)



Anhang E: Zum Ingenieurmodell aus Kapitel 8

Anhang E1: Studie – Prozentuale Verteilung der Spannungen entlang der Verzahnung für den reibungsfreien Ansatz

Spannungen entlang der Verzahnung nach Wörner (2017)- Werte k_i

Untersuchter Einfluss	Steigender Bereich [%]		Konstanter Bereich [%]		Fallender Bereich [%]	
	Links	Rechts	Links	Rechts	Links	Rechts
Ausgangssystem	8,63	9,54	83,03	82,95	8,35	7,51
verringerte Zahnanzahl	13,58	14,4	73,02	74,01	13,40	11,6
Erhöhte Zahnanzahl	5,51	6,03	88,66	88,87	5,84	5,1
verringerte Kraft	8,71	9,40	82,58	81,83	8,71	8,67
Zahnleistenhöhe	7,99	8,86	84,15	83,88	7,86	7,27
Verlängerung der Leiste über die Zähne hinaus	10,59	10,53	77,70	77,5	11,7	11,98
reine Vertikallast	9,39	10,97	80,97	81,23	9,64	7,80
Horizontallast	7,23	7,04	85,15	85,04	7,62	7,92
Mittelwert	9,0	9,6	81,9	81,9	9,1	8,5

$$k_i = \frac{\text{Mittelwert} [\%]}{100} [-]$$

Anhang E2: Studie – Prozentuale Verteilung der Spannungen entlang der Zahnflanke für den reibungsfreien Ansatz

$$k_{\text{Kopf,Flanke,Fuß}} = \frac{\text{Mittelwert} [\%]}{100} [-]$$

Steigender Bereich nach Wörner (2017) – Werte k_{Kopf} , k_{Flanke} , $k_{\text{Fuß}}$

Untersuchter Einfluss	Flankenkopf [%]		Zahnflanke [%]		Flankenfuß [%]	
	Links	Rechts	Links	Rechts	Links	Rechts
Ausgangssystem	19,1	12,0	58,0	47,8	22,9	40,2
verringerte Zahnanzahl	19,2	8,9	60,5	44,0	20,3	47,1
Erhöhte Zahnanzahl	19,5	14,1	66,8	44,0	13,7	42,0
verringerte Kraft	21,2	13,0	62,3	46,9	16,5	40,1
Zahnleistenhöhe	15,4	54,1	65,0	31,1	19,6	14,9
Verlängerung der Leiste über die Zähne hinaus	16,5	19,8	65,7	61,1	17,8	19,1
reine Vertikallast	22,6	21,1	53,6	56,7	23,9	22,2
Horizontallast	14,5	0,3	75,5	79,6	10,1	20,2
Mittelwert	18,5	18,0	63,4	51,4	18,1	30,7

Konstanter Bereich nach Wörner (2017)

Untersuchter Einfluss	Flankenkopf [%]		Zahnflanke [%]		Flankenfuß [%]	
	Links	Rechts	Links	Rechts	Links	Rechts
Ausgangssystem	14,6	7,8	67,7	45,1	17,7	47,1
verringerte Zahnanzahl	13,1	6,0	66,8	43,6	20,1	50,4
Erhöhte Zahnanzahl	15,0	11,3	66,3	42,0	18,7	46,7
verringerte Kraft	15,0	8,6	64,9	46,3	20,2	45,1
Zahnleistenhöhe	14,2	80,6	70,2	11,3	15,6	8,1
Verlängerung der Leiste über die Zähne hinaus	20,6	73,9	61,8	16,2	17,5	10,0
reine Vertikallast	19,1	20,6	57,8	58,1	23,1	21,4
Horizontallast	9,4	0,1	78,4	82,4	12,3	17,5
Mittelwert	15,1	26,1	66,7	43,1	18,2	30,8

Fallender Bereich nach Wörner (2017)

Untersuchter Einfluss	Flankenkopf [%]		Zahnflanke [%]		Flankenfuß [%]	
	Links	Rechts	Links	Rechts	Links	Rechts
Ausgangssystem	18,9	14,4	64,1	52,1	17,0	33,5
verringerte Zahnanzahl	15,9	12,7	65,0	49,0	19,0	38,3
Erhöhte Zahnanzahl	17,9	15,7	67,4	47,2	14,7	37,1
verringerte Kraft	16,7	14,4	67,3	46,5	16,0	39,1
Zahnleistenhöhe	14,3	51,4	67,5	33,7	18,2	14,9
Verlängerung der Leiste über die Zähne hinaus	15,7	72,1	61,5	17,1	22,8	10,9
reine Vertikallast	22,7	20,9	53,4	51,5	24,0	27,6
Horizontallast	9,5	0,2	80,8	62,4	9,7	37,4
Mittelwert	16,5	25,2	65,9	44,9	17,7	29,9

Anhang E3: Studie – Steigung m der Flankenbereiche für reibungsfreien Ansatz*Steigender Bereich nach Wörner (2017)*

Untersuchter Einfluss	Flankenkopf [%]		Zahnflanke [%]		Flankenfuß [%]	
	Links	Rechts	Links	Rechts	Links	Rechts
Ausgangssystem	-1563,0	-1348,0	-2,337	58,530	395,10	267,30
verringerte Zahnanzahl	-3576,0	-4716,0	0,384	116,50	1234,0	532,40
Erhöhte Zahnanzahl	-1029,0	-572,40	0,417	39,790	598,70	175,30
verringerte Kraft	-132,80	-109,10	0,040	6,190	54,840	28,180
Zahnleistenhöhe	-1164,0	-184,70	-7,181	-24,950	1140,0	1111,0
Verlängerung der Leiste über die Zähne hinaus	-934,70	-642,80	-15,300	-15,0	1143,0	938,10
reine Vertikallast	-861,90	-1049,0	5,936	5,734	515,60	591,40
Horizontallast	-549,20	23,70	33,470	76,450	236,20	143,70

Konstanter Bereich nach Wörner (2017)

Untersuchter Einfluss	Flankenkopf [%]		Zahnflanke [%]		Flankenfuß [%]	
	Links	Rechts	Links	Rechts	Links	Rechts
Ausgangssystem	-1948,0	-2093,0	22,810	74,30	690,70	261,60
verringerte Zahnanzahl	-5823,0	-5805,0	58,580	169,20	1388,0	531,50
Erhöhte Zahnanzahl	-1293,0	-497,0	13,360	54,920	305,80	169,90
verringerte Kraft	-208,60	-157,80	2,229	8,036	37,150	27,170
Zahnleistenhöhe	-999,40	-159,10	-29,730	-13,870	1567,0	1501,0
Verlängerung der Leiste über die Zähne hinaus	-426,80	-151,10	-20,080	-29,440	1169,0	1141,0
reine Vertikallast	-1273,0	-1031,0	3,264	4,546	488,40	564,0
Horizontallast	-1431,0	16,520	49,970	95,970	237,30	212,20

Fallender Bereich nach Wörner (2017)

Untersuchter Einfluss	Flankenkopf [%]		Zahnflanke [%]		Flankenfuß [%]	
	Links	Rechts	Links	Rechts	Links	Rechts
Ausgangssystem	-1163,0	-1444,0	10,380	39,570	1023,0	385,20
verringerte Zahnanzahl	-4097,0	-3928,0	25,450	79,110	1991,0	740,50
Erhöhte Zahnanzahl	-955,80	-752,0	6,406	24,70	657,20	208,70
verringerte Kraft	-197,0	-148,90	0,883	3,413	74,630	29,360
Zahnleistenhöhe	-1057,0	-177,20	3,378	-15,940	1940,0	1572,0
Verlängerung der Leiste über die Zähne hinaus	-854,50	-154,0	2,038	-15,530	1025,0	1295,0
reine Vertikallast	-878,10	-995,90	5,472	4,826	522,30	411,20
Horizontallast	-923,50	11,760	31,840	46,160	185,90	68,640

Anhang E4: Studie – Prozentuale Verteilung der Spannungen entlang der Verzahnung für den reibungsbehafteten Ansatz

Spannungen entlang der Verzahnung nach Willacker (2018)

Untersuchter Einfluss	Steigender Bereich [%]		Konstanter Bereich [%]		Fallender Bereich [%]	
	Links	Rechts	Links	Rechts	Links	Rechts
Ausgangssystem	8,56	7,76	82,81	81,58	8,63	10,67
verringerte Zahnanzahl	12,87	16,85	74,24	72,89	12,89	10,26
Erhöhte Zahnanzahl	7,46	8,81	85,10	84,56	7,44	6,63
verringerte Kraft	8,62	10,84	82,81	82,60	8,57	6,56
Erhöhte Kraft	8,62	10,84	82,81	80,82	8,57	8,35
Zahnleistenhöhe	7,91	9,84	84,18	83,51	7,91	6,66
Verlängerung der Leiste über die Zähne hinaus	10,80	10,78	77,64	77,42	11,56	11,80
reine Vertikallast	9,85	11,00	80,19	80,68	9,96	8,31
Horizontallast	6,79	7,21	86,49	86,06	6,72	6,73
Mittelwert	9,1	10,4	81,8	81,1	9,1	8,4

Anhang E5: Studie – Prozentuale Verteilung der Spannungen entlang der Zahnflanke für den reibungsbehafteten Ansatz

Spannungen an der Zahnflanke nach Willacker (2017)

Untersuchter Einfluss	Flankenkopf [%]		Zahnflanke [%]		Flankenfuß [%]	
	Links	Rechts	Links	Rechts	Links	Rechts
Ausgangssystem	16,02	5,42	65,76	50,11	18,22	44,47
verringerte Zahnanzahl	14,15	2,87	65,47	45,41	20,38	51,72
Erhöhte Zahnanzahl	16,19	6,91	64,37	44,67	19,44	48,42
verringerte Kraft	16,24	5,27	62,76	48,35	21	46,38
Erhöhte Kraft	15,95	4,87	62,11	48,39	21,94	46,74
Zahnleistenhöhe	15,77	3,82	66,11	74,94	18,12	21,24
Verlängerung der Leiste über die Zähne hinaus	21,01	77,25	60,03	16,86	18,96	5,89
reine Vertikallast	9,27	0,19	78,07	82,56	12,66	17,25
Horizontallast	18,02	5,27	57,57	48,35	24,41	46,38

Anhang E6: Studie – Steigung m der Flankenbereiche für reibungsbehafteten Ansatz

Steigender Bereich nach Wörner (2017)

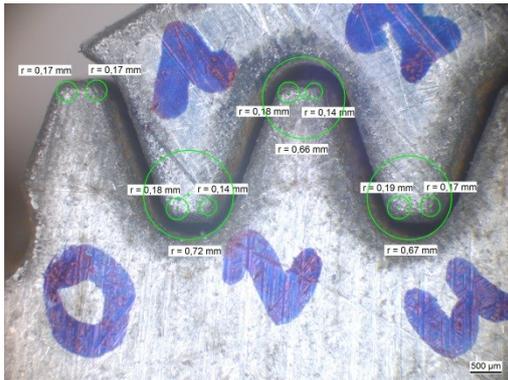
Untersuchter Einfluss	Flankenkopf [%]		Zahnflanke [%]		Flankenfuß [%]	
	Links	Rechts	Links	Rechts	Links	Rechts
Ausgangssystem	-1771,20	-457,62	17,62	73,85	659,91	215,43
verringerte Zahnanzahl	-2457,0	-1017,70	23,396	88,49	597,04	204,64
Erhöhte Zahnanzahl	-1156,70	-204,28	10,07	45,52	323,59	131,62
verringerte Kraft	-184,20	-58,50	1,81	7,17	39,87	21,24
Erhöhte Kraft	-2688,50	-884,57	25,01	108,65	812,96	307,84
Zahnleistenhöhe	-1836,40	-152,24	21,94	97,32	609,89	508,51
Verlängerung der Leiste über die Zähne hinaus	-398,75	-119,02	-16,07	-67,43	1082,20	466,65
reine Vertikallast	-899,76	-737,57	7,14	7,80	415,03	483,71
Horizontallast	-1390,60	34,70	29,55	94,26	483,83	213,66

Anhang F: Vermessung der Stahlzähne I/P1 bis I/P4

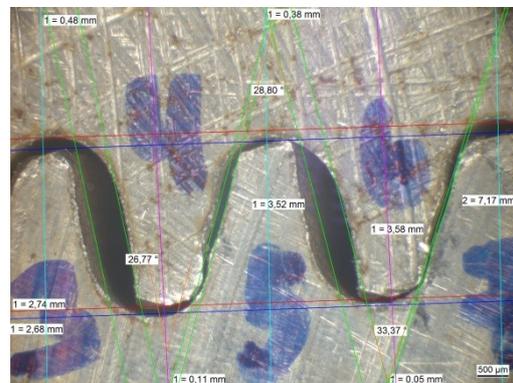
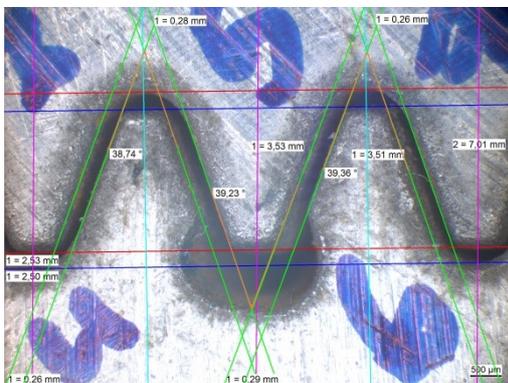
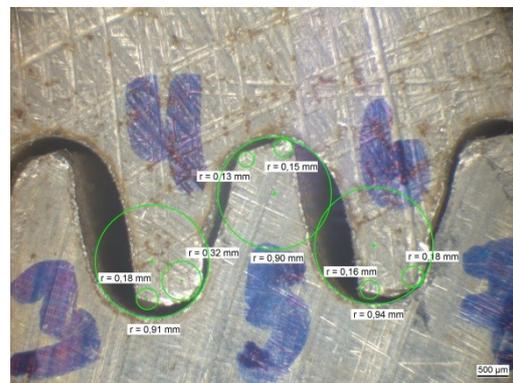
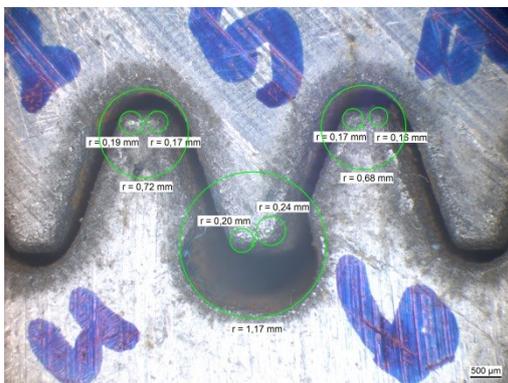
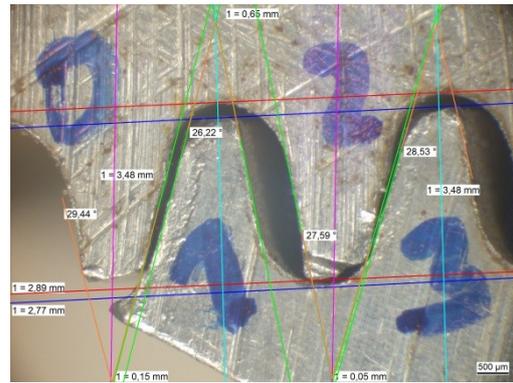
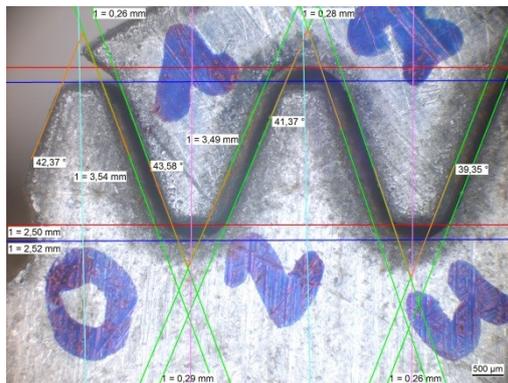
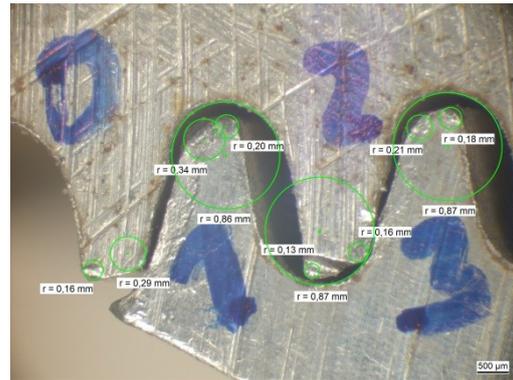
Anhang F1: Vermessung mithilfe eines Stereomikroskops

Prüfkörper 1 – Vorher

Vorderseite

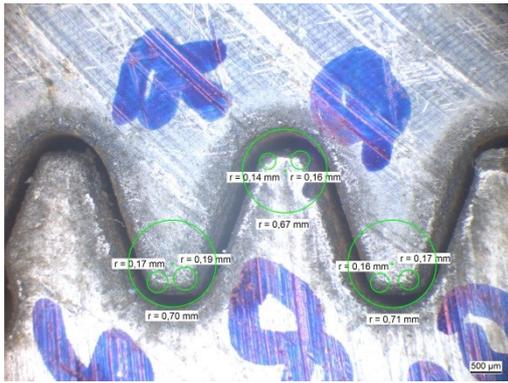


Rückseite

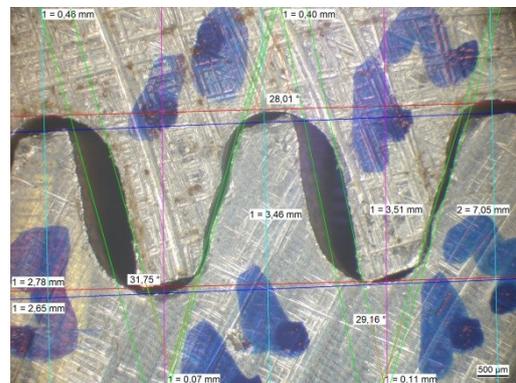
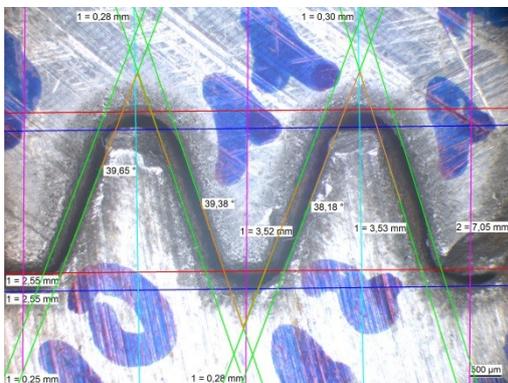
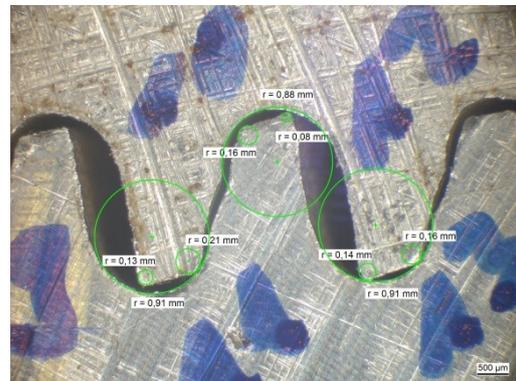
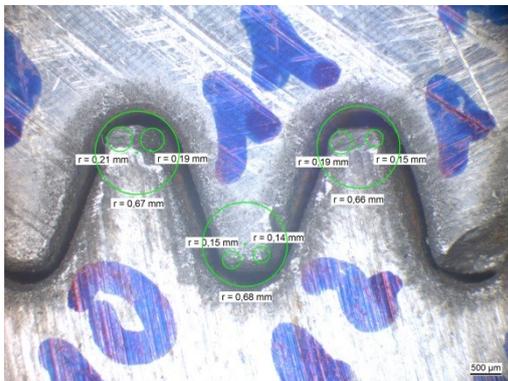
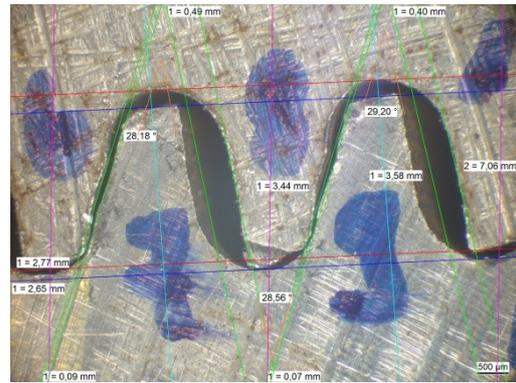
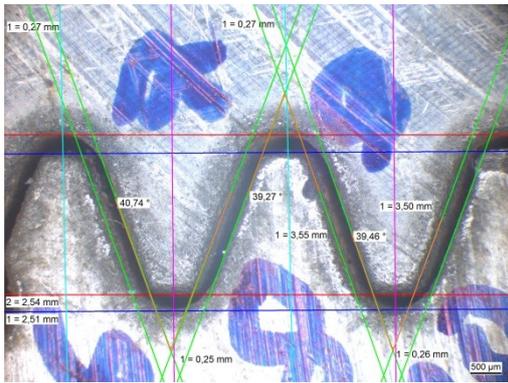
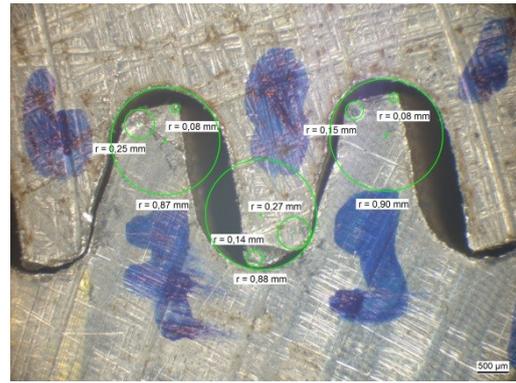


Prüfkörper 1 – Vorher

Vorderseite

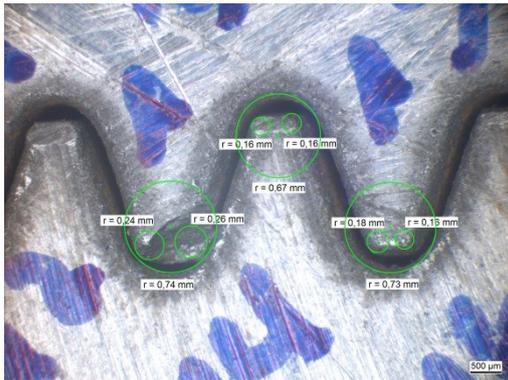


Rückseite

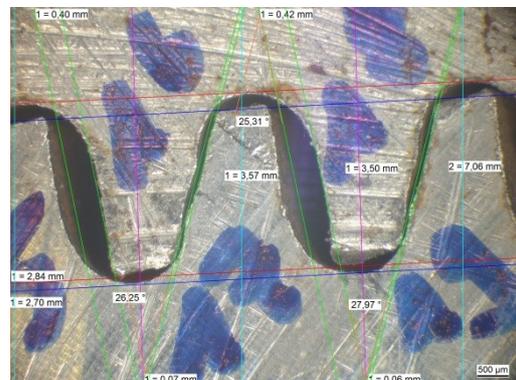
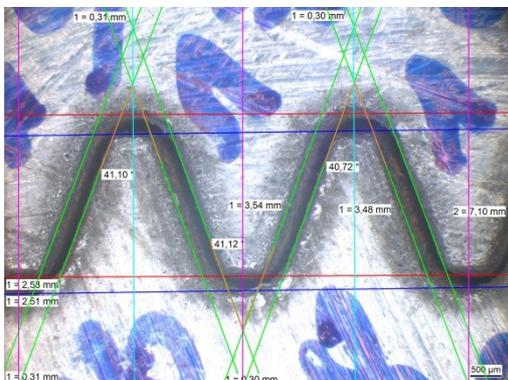
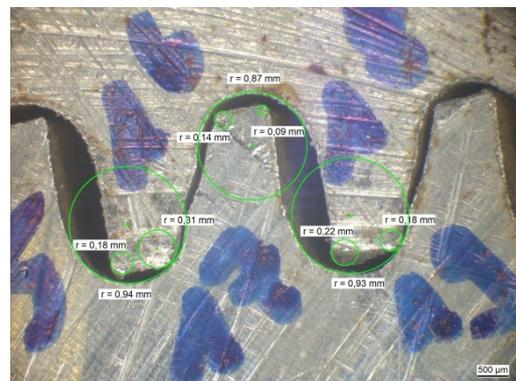
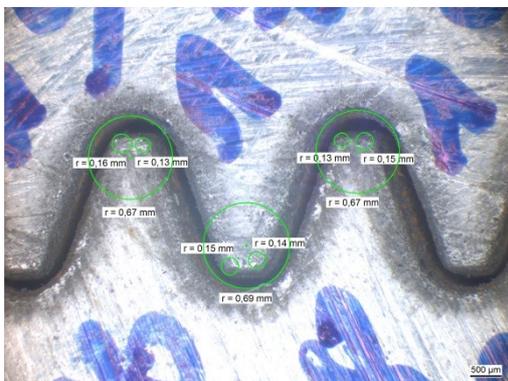
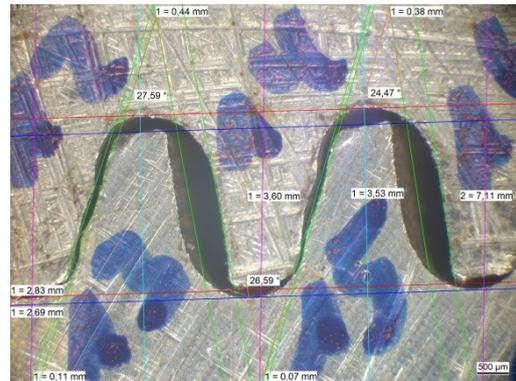
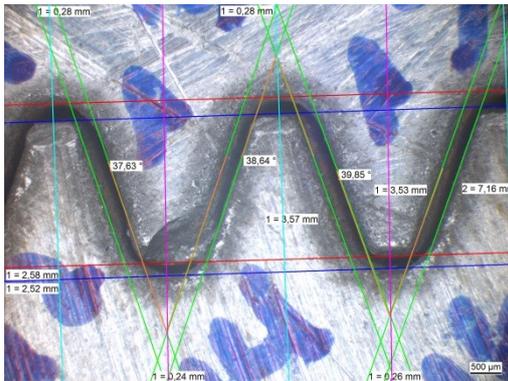
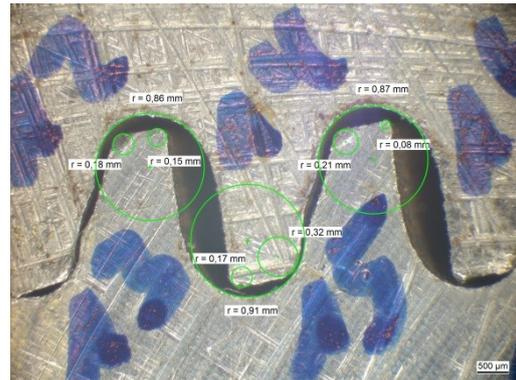


Prüfkörper 1 – Vorher

Vorderseite

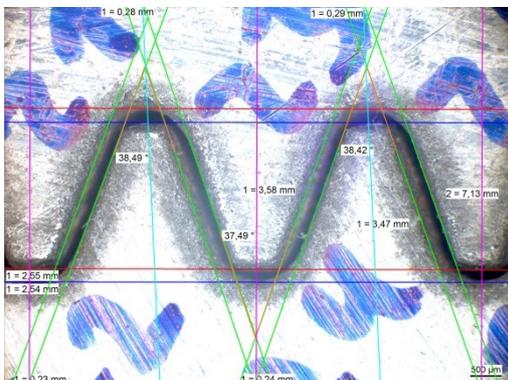
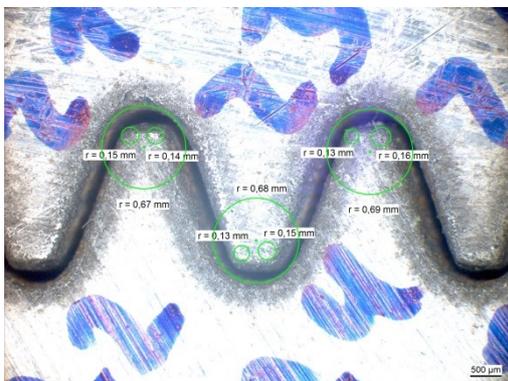
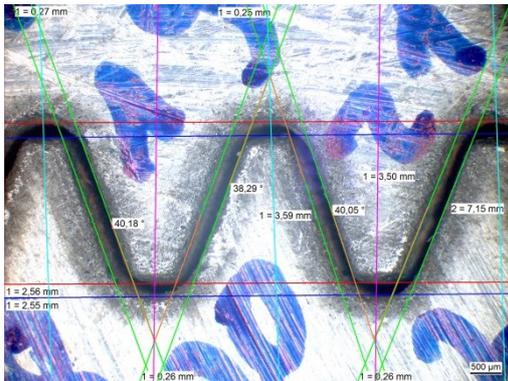
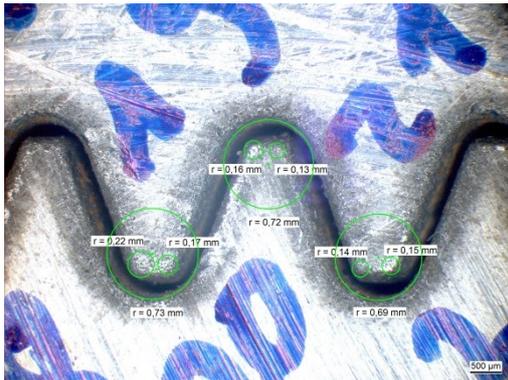


Rückseite

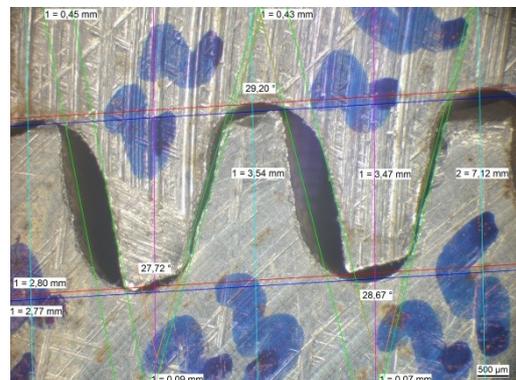
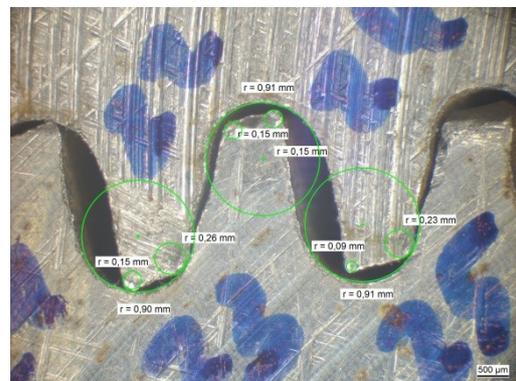
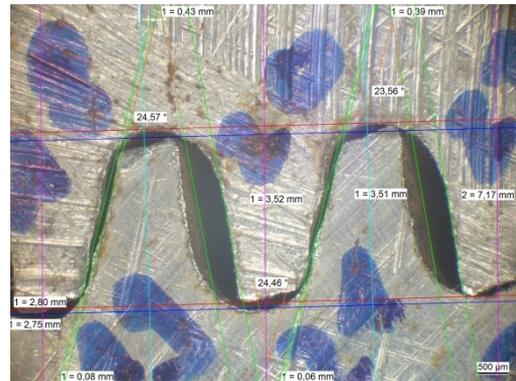
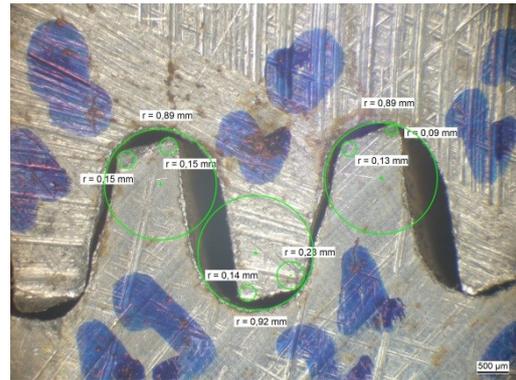


Prüfkörper 1 – Vorher

Vorderseite

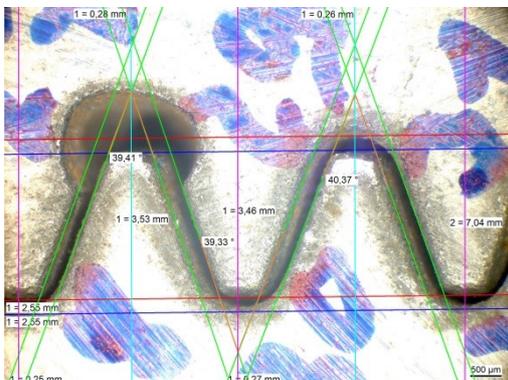
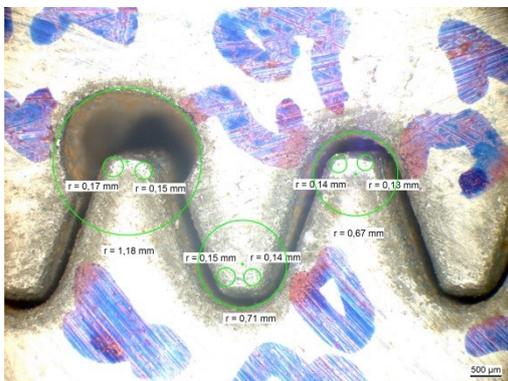
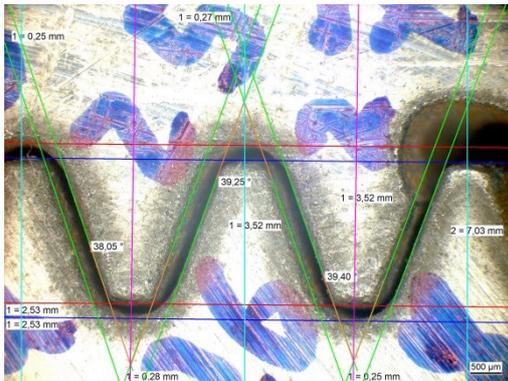
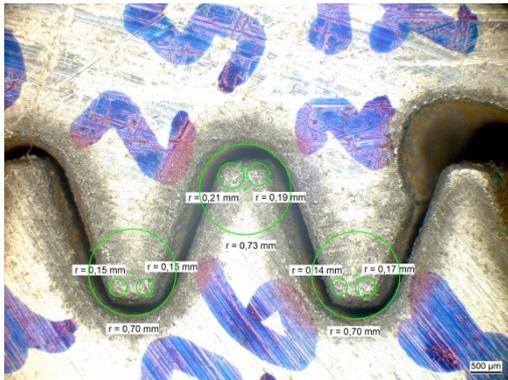


Rückseite

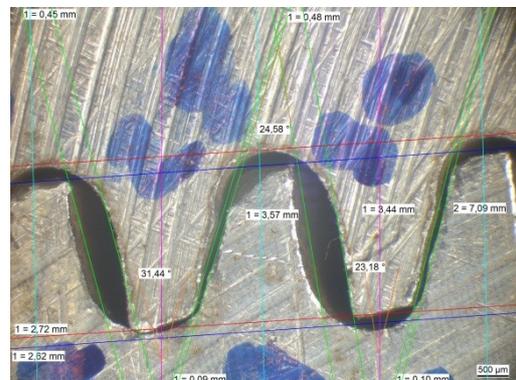
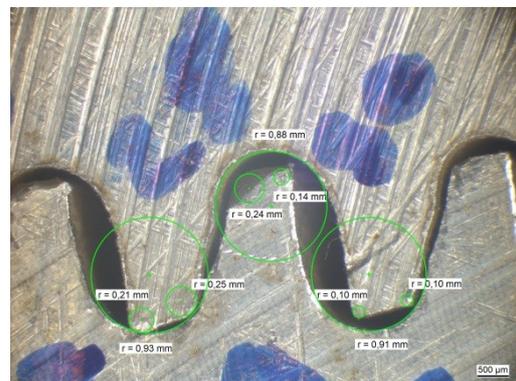
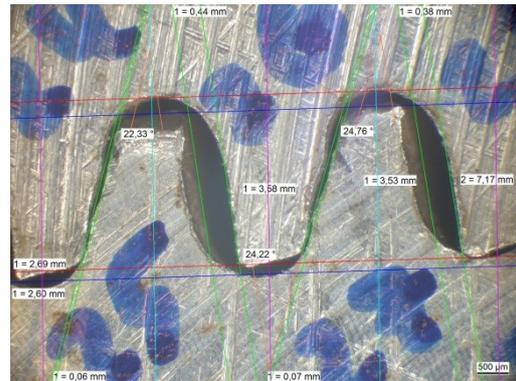
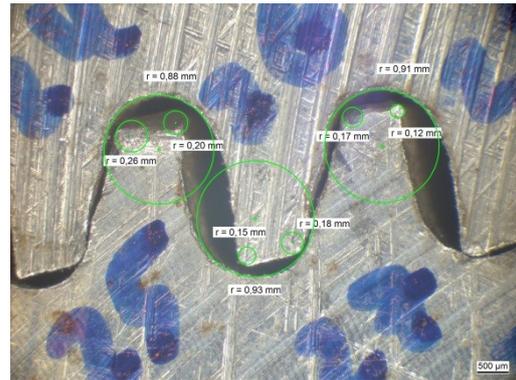


Prüfkörper 1 – Vorher

Vorderseite

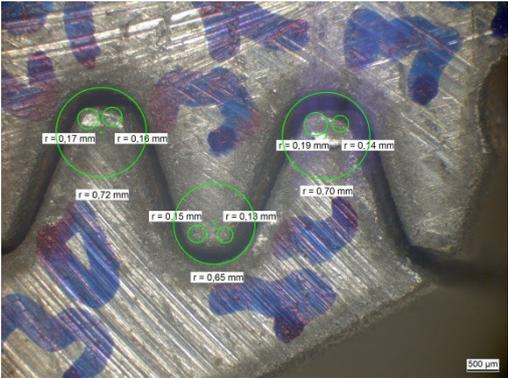


Rückseite

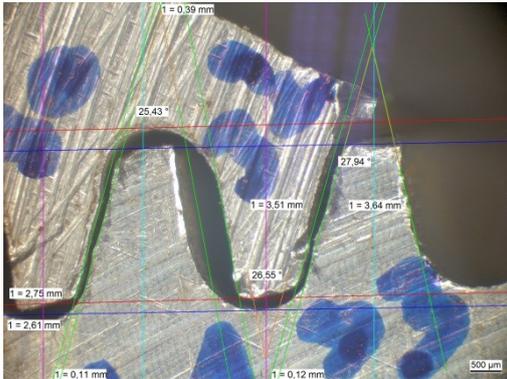
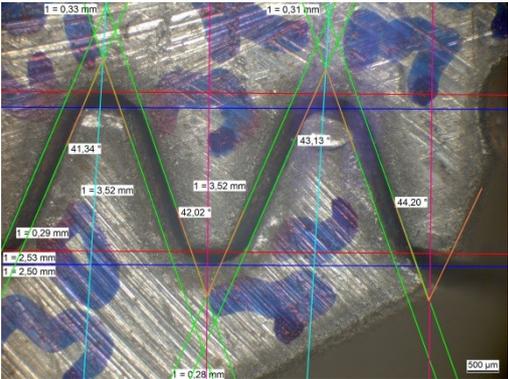
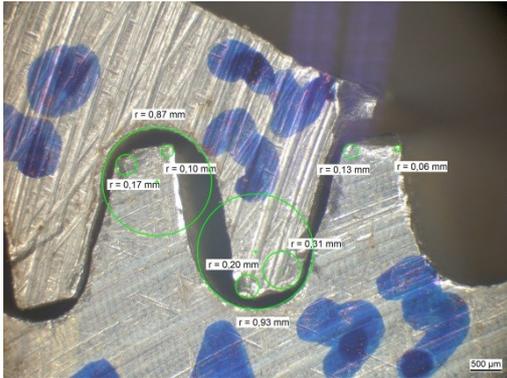


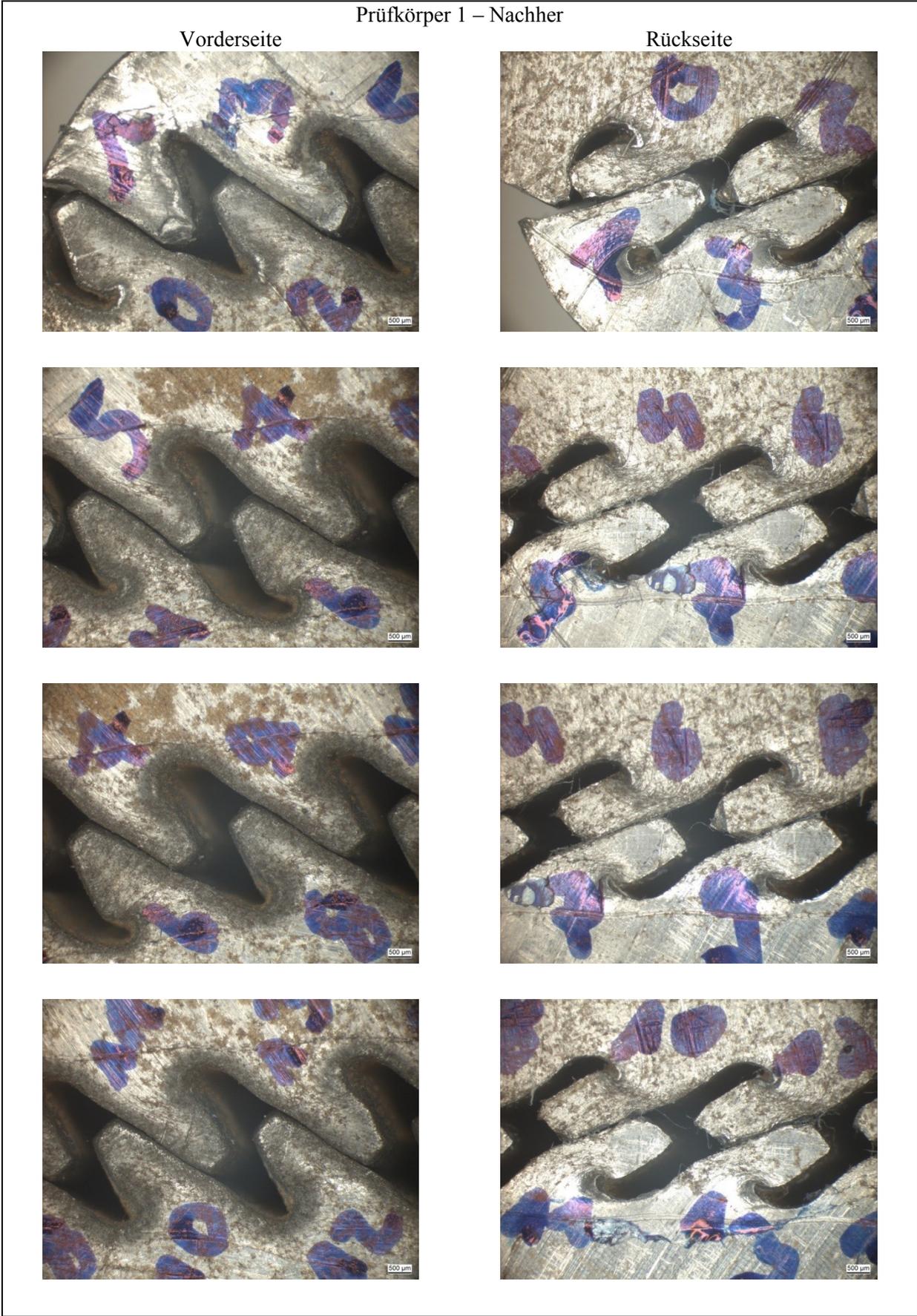
Prüfkörper 1 – Vorher

Vorderseite



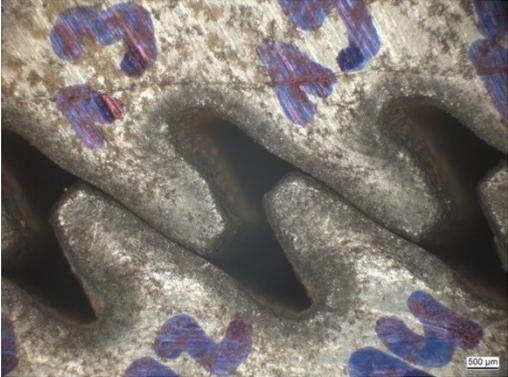
Rückseite



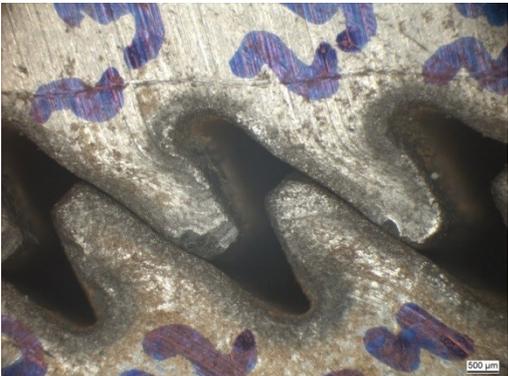
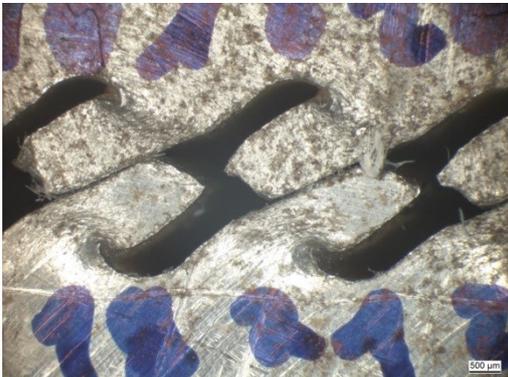
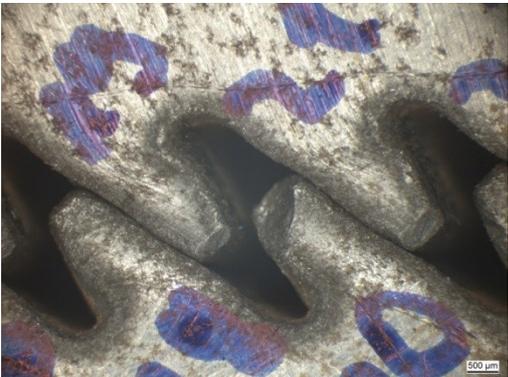


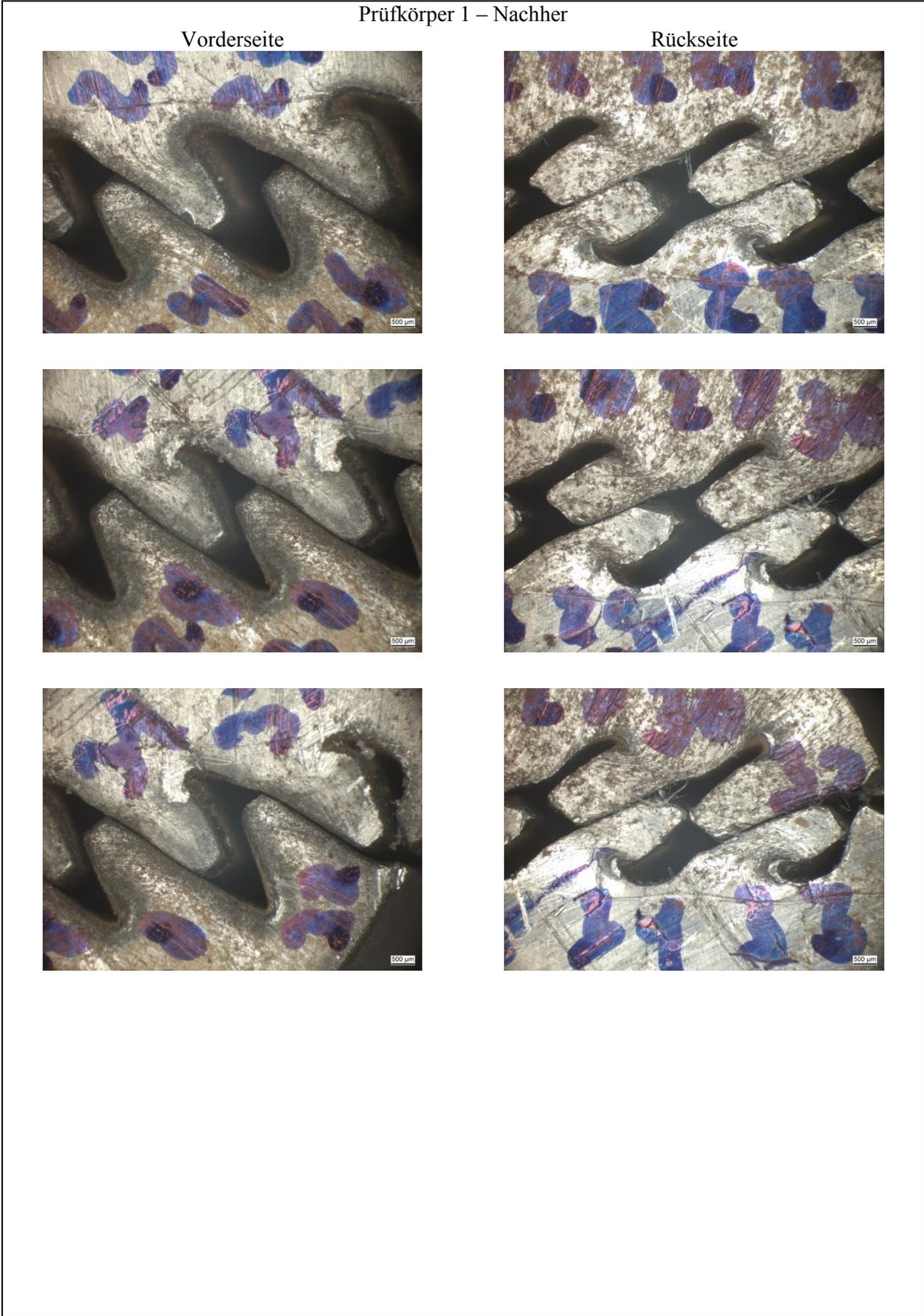
Prüfkörper 1 – Nachher

Vorderseite



Rückseite





Anhang F2: Auswertung der Vermessungen

Prüfkörper 1 u. 2 Radius r1

Bez.	Auto CAD	PK1		PK2		Vgl. Autocad - PK1				Vgl. Autocad - PK2				Vgl. Pk1 - PK2			
		V	H	V	H	V		H		V		H		V		H	
		mm	mm	mm	mm	mm	%	mm	%	mm	%	mm	%	mm	%	mm	%
0	0,13	0,17	0,16	0,15	0,12	-0,04	-31	-0,03	-23	-0,02	-15	0,01	8	0,02	12	0,04	25
1	0,13	0,18	0,34	0,22	0,1	-0,05	-38	-0,21	-162	-0,09	-69	0,03	23	-0,04	-22	0,24	71
2	0,13	0,18	0,13	0,15	0,16	-0,05	-38	0	0	-0,02	-15	-0,03	-23	0,03	17	-0,03	-23
3	0,13	0,19	0,21	0,18	0,16	-0,06	-46	-0,08	-62	-0,05	-38	-0,03	-23	0,01	5	0,05	24
4	0,13	0,19	0,18	0,15	0,09	-0,06	-46	-0,05	-38	-0,02	-15	0,04	31	0,04	21	0,09	50
5	0,13	0,2	0,13	0,14	0,34	-0,07	-54	0	0	-0,01	-8	-0,21	-162	0,06	30	-0,21	-162
6	0,13	0,17	0,16	0,17	0,08	-0,04	-31	-0,03	-23	-0,04	-31	0,05	38	0	0	0,08	50
7	0,13	0,17	0,25	0,16	0,23	-0,04	-31	-0,12	-92	-0,03	-23	-0,1	-77	0,01	6	0,02	8
8	0,13	0,14	0,14	0,17	0,13	-0,01	-8	-0,01	-8	-0,04	-31	0	0	-0,03	-21	0,01	7
9	0,13	0,16	0,15	0,18	0,26	-0,03	-23	-0,02	-15	-0,05	-38	-0,13	-100	-0,02	-13	-0,11	-73
10	0,13	0,21	0,13	0,2	0,14	-0,08	-62	0	0	-0,07	-54	-0,01	-8	0,01	5	-0,01	-8
11	0,13	0,15	0,16	0,17	0,18	-0,02	-15	-0,03	-23	-0,04	-31	-0,05	-38	-0,02	-13	-0,02	-13
12	0,13	0,19	0,14	0,18	0,08	-0,06	-46	-0,01	-8	-0,05	-38	0,05	38	0,01	5	0,06	43
13	0,13	0,24	0,18	0,14	0,24	-0,11	-85	-0,05	-38	-0,01	-8	-0,11	-85	0,1	42	-0,06	-33
14	0,13	0,16	0,17	0,15	0,12	-0,03	-23	-0,04	-31	-0,02	-15	0,01	8	0,01	6	0,05	29
15	0,13	0,18	0,21	0,17	0,18	-0,05	-38	-0,08	-62	-0,04	-31	-0,05	-38	0,01	6	0,03	14
16	0,13	0,16	0,18	0,17	0,16	-0,03	-23	-0,05	-38	-0,04	-31	-0,03	-23	-0,01	-6	0,02	11
17	0,13	0,15	0,14	0,14	0,18	-0,02	-15	-0,01	-8	-0,01	-8	-0,05	-38	0,01	7	-0,04	-29
18	0,13	0,13	0,22	0,19	0,16	0	0	-0,09	-69	-0,06	-46	-0,03	-23	-0,06	-46	0,06	27
19	0,13	0,22	0,15	0,17	0,2	-0,09	-69	-0,02	-15	-0,04	-31	-0,07	-54	0,05	23	-0,05	-33
20	0,13	0,16	0,14	0,13	0,13	-0,03	-23	-0,01	-8	0	0	0	0	0,03	19	0,01	7
21	0,13	0,14	0,13	0,16	0,19	-0,01	-8	0	0	-0,03	-23	-0,06	-46	-0,02	-14	-0,06	-46
22	0,13	0,15	0,15	0,14	0,1	-0,02	-15	-0,02	-15	-0,01	-8	0,03	23	0,01	7	0,05	33
23	0,13	0,13	0,15	0,14	0,23	0	0	-0,02	-15	-0,01	-8	-0,1	-77	-0,01	-8	-0,08	-53
24	0,13	0,13	0,09	0,14	0,11	0	0	0,04	31	-0,01	-8	0,02	15	-0,01	-8	-0,02	-22
25	0,13	0,15	0,26	0,17	0,23	-0,02	-15	-0,13	-100	-0,04	-31	-0,1	-77	-0,02	-13	0,03	12
26	0,13	0,21	0,15	0,16	0,13	-0,08	-62	-0,02	-15	-0,03	-23	0	0	0,05	24	0,02	13
27	0,13	0,14	0,17	0,18	0,15	-0,01	-8	-0,04	-31	-0,05	-38	-0,02	-15	-0,04	-29	0,02	12

Anhang F: Vermessung der Stahlzähne I/P1 bis I/P4

28	0,13	0,17	0,21	0,16	0,13	-0,04	-31	-0,08	-62	-0,03	-23	0	0	0,01	6	0,08	38
29	0,13	0,15	0,24	0,15	0,16	-0,02	-15	-0,11	-85	-0,02	-15	-0,03	-23	0	0	0,08	33
30	0,13	0,17	0,1	0,18	0,16	-0,04	-31	0,03	23	-0,05	-38	-0,03	-23	-0,01	-6	-0,06	-60
31	0,13	0,15	0,17	0,16	0,2	-0,02	-15	-0,04	-31	-0,03	-23	-0,07	-54	-0,01	-7	-0,03	-18
32	0,13	0,19	0,2	0,2	0,14	-0,06	-46	-0,07	-54	-0,07	-54	-0,01	-8	-0,01	-5	0,06	30
33	0,13	0,14	0,13	0,16	0,21	-0,01	-8	0	0	-0,03	-23	-0,08	-62	-0,02	-14	-0,08	-62

Prüfkörper 1 u. 2 Radius r2

Bez.	Auto CAD	PK1		PK2		Vgl. Autocad - PK1				Vgl. Autocad - PK2				Vgl. Pk1 - PK2			
		V	H	V	H	V		H		V		H		V		H	
		mm	mm	mm	mm	mm	%	mm	%	mm	%	mm	%	mm	%	mm	%
0	0,13	0,17	0,29	0,14	0,13	-0,04	-31	-0,16	-123	-0,01	-8	0	0	0,03	18	0,16	55
1	0,13	0,14	0,2	0,15	0,18	-0,01	-8	-0,07	-54	-0,02	-15	-0,05	-38	-0,01	-7	0,02	10
2	0,13	0,14	0,16	0,16	0,13	-0,01	-8	-0,03	-23	-0,03	-23	0	0	-0,02	-14	0,03	19
3	0,13	0,17	0,18	0,17	0,1	-0,04	-31	-0,05	-38	-0,04	-31	0,03	23	0	0	0,08	44
4	0,13	0,17	0,32	0,16	0,18	-0,04	-31	-0,19	-146	-0,03	-23	-0,05	-38	0,01	6	0,14	44
5	0,13	0,24	0,15	0,15	0,21	-0,11	-85	-0,02	-15	-0,02	-15	-0,08	-62	0,09	38	-0,06	-40
6	0,13	0,16	0,18	0,16	0,17	-0,03	-23	-0,05	-38	-0,03	-23	-0,04	-31	0	0	0,01	6
7	0,13	0,19	0,08	0,17	0,1	-0,06	-46	0,05	38	-0,04	-31	0,03	23	0,02	11	-0,02	-25
8	0,13	0,16	0,27	0,17	0,16	-0,03	-23	-0,14	-108	-0,04	-31	-0,03	-23	-0,01	-6	0,11	41
9	0,13	0,17	0,08	0,2	0,07	-0,04	-31	0,05	38	-0,07	-54	0,06	46	-0,03	-18	0,01	13
10	0,13	0,19	0,21	0,18	0,19	-0,06	-46	-0,08	-62	-0,05	-38	-0,06	-46	0,01	5	0,02	10
11	0,13	0,14	0,08	0,16	0,08	-0,01	-8	0,05	38	-0,03	-23	0,05	38	-0,02	-14	0	0
12	0,13	0,15	0,16	0,17	0,11	-0,02	-15	-0,03	-23	-0,04	-31	0,02	15	-0,02	-13	0,05	31
13	0,13	0,26	0,15	0,14	0,1	-0,13	-100	-0,02	-15	-0,01	-8	0,03	23	0,12	46	0,05	33
14	0,13	0,16	0,32	0,16	0,16	-0,03	-23	-0,19	-146	-0,03	-23	-0,03	-23	0	0	0,16	50
15	0,13	0,18	0,08	0,15	0,1	-0,05	-38	0,05	38	-0,02	-15	0,03	23	0,03	17	-0,02	-25
16	0,13	0,13	0,31	0,18	0,17	0	0	-0,18	-138	-0,05	-38	-0,04	-31	-0,05	-38	0,14	45
17	0,13	0,14	0,09	0,17	0,14	-0,01	-8	0,04	31	-0,04	-31	-0,01	-8	-0,03	-21	-0,05	-56
18	0,13	0,15	0,18	0,16	0,11	-0,02	-15	-0,05	-38	-0,03	-23	0,02	15	-0,01	-7	0,07	39
19	0,13	0,17	0,15	0,19	0,09	-0,04	-31	-0,02	-15	-0,06	-46	0,04	31	-0,02	-12	0,06	40
20	0,13	0,13	0,23	0,16	0,18	0	0	-0,1	-77	-0,03	-23	-0,05	-38	-0,03	-23	0,05	22
21	0,13	0,15	0,09	0,15	0,08	-0,02	-15	0,04	31	-0,02	-15	0,05	38	0	0	0,01	11

Anhang F: Vermessung der Stahlzähne I/P1 bis I/P4

22	0,13	0,14	0,26	0,13	0,17	-0,01	-8	-0,13	-100	0	0	-0,04	-31	0,01	7	0,09	35
23	0,13	0,15	0,15	0,17	0,09	-0,02	-15	-0,02	-15	-0,04	-31	0,04	31	-0,02	-13	0,06	40
24	0,13	0,16	0,23	0,18	0,15	-0,03	-23	-0,1	-77	-0,05	-38	-0,02	-15	-0,02	-13	0,08	35
25	0,13	0,15	0,2	0,17	0,06	-0,02	-15	-0,07	-54	-0,04	-31	0,07	54	-0,02	-13	0,14	70
26	0,13	0,19	0,18	0,17	0,19	-0,06	-46	-0,05	-38	-0,04	-31	-0,06	-46	0,02	11	-0,01	-6
27	0,13	0,17	0,12	0,17	0,12	-0,04	-31	0,01	8	-0,04	-31	0,01	8	0	0	0	0
28	0,13	0,15	0,25	0,16	0,29	-0,02	-15	-0,12	-92	-0,03	-23	-0,16	-123	-0,01	-7	-0,04	-16
29	0,13	0,14	0,14	0,2	0,12	-0,01	-8	-0,01	-8	-0,07	-54	0,01	8	-0,06	-43	0,02	14
30	0,13	0,16	0,1	0,2	0,16	-0,03	-23	0,03	23	-0,07	-54	-0,03	-23	-0,04	-25	-0,06	-60
31	0,13	0,13	0,1	0,15	0,13	0	0	0,03	23	-0,02	-15	0	0	-0,02	-15	-0,03	-30
32	0,13	0,14	0,31	0,17	0,14	-0,01	-8	-0,18	-138	-0,04	-31	-0,01	-8	-0,03	-21	0,17	55
33	0,13	0,19	0,06	0,13	0,1	-0,06	-46	0,07	54	0	0	0,03	23	0,06	32	-0,04	-67

Prüfkörper 1 u. 2 Radius r3

Bez.	Auto CAD	PK1		PK2		Vgl. Autocad - PK1				Vgl. Autocad - PK2				Vgl. Pk1 - PK2			
		V	H	V	H	V	%	H	%	V	%	H	%	V	%	H	%
0_2	0,5	0,72	0,86	0,65	0,97	-0,22	-44	-0,36	-72	-0,15	-30	-0,47	-94	0,07	10	-0,11	-13
1_3	0,5	0,66	0,87	0,71	0,93	-0,16	-32	-0,37	-74	-0,21	-42	-0,43	-86	-0,05	-8	-0,06	-7
2_4	0,5	0,67	0,87	0,67	0,94	-0,17	-34	-0,37	-74	-0,17	-34	-0,44	-88	0	0	-0,07	-8
3_5	0,5	0,72	0,91	0,71	0,88	-0,22	-44	-0,41	-82	-0,21	-42	-0,38	-76	0,01	1	0,03	3
4_6	0,5	1,17	0,9	1,16	0,96	-0,67	-134	-0,4	-80	-0,66	-132	-0,46	-92	0,01	1	-0,06	-7
5_7	0,5	0,68	0,94	0,66	0,9	-0,18	-36	-0,44	-88	-0,16	-32	-0,4	-80	0,02	3	0,04	4
6_8	0,5	0,7	0,87	0,6	0,92	-0,2	-40	-0,37	-74	-0,1	-20	-0,42	-84	0,1	14	-0,05	-6
7_9	0,5	0,67	0,88	0,76	0,89	-0,17	-34	-0,38	-76	-0,26	-52	-0,39	-78	-0,09	-13	-0,01	-1
8_10	0,5	0,71	0,9	0,62	0,93	-0,21	-42	-0,4	-80	-0,12	-24	-0,43	-86	0,09	13	-0,03	-3
9_11	0,5	0,67	0,91	0,68	0,82	-0,17	-34	-0,41	-82	-0,18	-36	-0,32	-64	-0,01	-1	0,09	10
10_12	0,5	0,68	0,88	0,65	0,97	-0,18	-36	-0,38	-76	-0,15	-30	-0,47	-94	0,03	4	-0,09	-10
11_13	0,5	0,66	0,91	0,67	0,94	-0,16	-32	-0,41	-82	-0,17	-34	-0,44	-88	-0,01	-2	-0,03	-3
12_14	0,5	0,74	0,86	0,66	0,96	-0,24	-48	-0,36	-72	-0,16	-32	-0,46	-92	0,08	11	-0,1	-12
13_15	0,5	0,67	0,91	0,74	0,84	-0,17	-34	-0,41	-82	-0,24	-48	-0,34	-68	-0,07	-10	0,07	8
14_16	0,5	0,73	0,87	0,69	0,97	-0,23	-46	-0,37	-74	-0,19	-38	-0,47	-94	0,04	5	-0,1	-11
15_17	0,5	0,67	0,94	0,75	0,82	-0,17	-34	-0,44	-88	-0,25	-50	-0,32	-64	-0,08	-12	0,12	13

Anhang F: Vermessung der Stahlzähne I/P1 bis I/P4

16_18	0,5	0,69	0,87	0,74	0,92	-0,19	-38	-0,37	-74	-0,24	-48	-0,42	-84	-0,05	-7	-0,05	-6
17_19	0,5	0,67	0,93	0,73	0,89	-0,17	-34	-0,43	-86	-0,23	-46	-0,39	-78	-0,06	-9	0,04	4
18_20	0,5	0,73	0,89	0,67	0,98	-0,23	-46	-0,39	-78	-0,17	-34	-0,48	-96	0,06	8	-0,09	-10
19_21	0,5	0,72	0,92	0,7	0,9	-0,22	-44	-0,42	-84	-0,2	-40	-0,4	-80	0,02	3	0,02	2
20_22	0,5	0,69	0,89	0,63	0,93	-0,19	-38	-0,39	-78	-0,13	-26	-0,43	-86	0,06	9	-0,04	-4
21_23	0,5	0,67	0,9	0,64	0,91	-0,17	-34	-0,4	-80	-0,14	-28	-0,41	-82	0,03	4	-0,01	-1
22_24	0,5	0,68	0,91	0,7	0,92	-0,18	-36	-0,41	-82	-0,2	-40	-0,42	-84	-0,02	-3	-0,01	-1
23_25	0,5	0,69	0,91	0,73	0,92	-0,19	-38	-0,41	-82	-0,23	-46	-0,42	-84	-0,04	-6	-0,01	-1
24_26	0,5	0,7	0,88	0,65	0,99	-0,2	-40	-0,38	-76	-0,15	-30	-0,49	-98	0,05	7	-0,11	-13
25_27	0,5	0,73	0,93	0,73	0,88	-0,23	-46	-0,43	-86	-0,23	-46	-0,38	-76	0	0	0,05	5
26_28	0,5	0,7	0,91	0,7	1,02	-0,2	-40	-0,41	-82	-0,2	-40	-0,52	-104	0	0	-0,11	-12
27_29	0,5	1,18	0,93	1,12	0,93	-0,68	-136	-0,43	-86	-0,62	-124	-0,43	-86	0,06	5	0	0
28_30	0,5	0,71	0,88	0,65	0,88	-0,21	-42	-0,38	-76	-0,15	-30	-0,38	-76	0,06	8	0	0
29_31	0,5	0,72	0,91	0,79	0,76	-0,22	-44	-0,41	-82	-0,29	-58	-0,26	-52	-0,07	-10	0,15	16
30_32	0,5	0,65	0,87	0,55	0,94	-0,15	-30	-0,37	-74	-0,05	-10	-0,44	-88	0,1	15	-0,07	-8
31_33	0,5	0,7	0,93	0,76	0,92	-0,2	-40	-0,43	-86	-0,26	-52	-0,42	-84	-0,06	-9	0,01	1

Prüfkörper 1 u. 2 Abstand a

Bez.	Auto CAD	PK1		PK2		Vgl. Autocad - PK1				Vgl. Autocad - PK2				Vgl. Pk1 - PK2			
		V mm	H mm	V mm	H mm	V mm	H		V mm	H		V mm	H				
							mm	%		mm	%		mm	%	mm	%	
0_1	0	0,26	0,15	0,25	0,14	-0,26	/	-0,15	/	-0,25	/	-0,14	/	0,01	4	0,01	7
1_2	0	0,29	0,65	0,11	0,42	-0,29	/	-0,65	/	-0,11	/	-0,42	/	0,18	62	0,23	35
2_3	0	0,28	0,05	0,23	0,11	-0,28	/	-0,05	/	-0,23	/	-0,11	/	0,05	18	-0,06	-120
3_4	0	0,26	0,48	0,11	0,35	-0,26	/	-0,48	/	-0,11	/	-0,35	/	0,15	58	0,13	27
4_5	0	0,28	0,11	0,21	0,08	-0,28	/	-0,11	/	-0,21	/	-0,08	/	0,07	25	0,03	27
5_6	0	0,29	0,38	0,1	0,77	-0,29	/	-0,38	/	-0,1	/	-0,77	/	0,19	66	-0,39	-103
6_7	0	0,27	0,09	0,16	0,1	-0,27	/	-0,09	/	-0,16	/	-0,1	/	0,11	41	-0,01	-11
7_8	0	0,25	0,49	0,16	0,5	-0,25	/	-0,49	/	-0,16	/	-0,5	/	0,09	36	-0,01	-2
8_9	0	0,27	0,07	0,44	0,09	-0,27	/	-0,07	/	-0,44	/	-0,09	/	-0,17	-63	-0,02	-29
9_10	0	0,26	0,46	0,23	0,52	-0,26	/	-0,46	/	-0,23	/	-0,52	/	0,03	12	-0,06	-13
10_11	0	0,28	0,07	0,29	0,12	-0,28	/	-0,07	/	-0,29	/	-0,12	/	-0,01	-4	-0,05	-71
11_12	0	0,28	0,4	0,17	0,48	-0,28	/	-0,4	/	-0,17	/	-0,48	/	0,11	39	-0,08	-20
12_13	0	0,28	0,11	0,26	0,08	-0,28	/	-0,11	/	-0,26	/	-0,08	/	0,02	7	0,03	27
13_14	0	0,24	0,44	0,12	0,45	-0,24	/	-0,44	/	-0,12	/	-0,45	/	0,12	50	-0,01	-2
14_15	0	0,28	0,07	0,27	0,11	-0,28	/	-0,07	/	-0,27	/	-0,11	/	0,01	4	-0,04	-57
15_16	0	0,31	0,4	0,1	0,48	-0,31	/	-0,4	/	-0,1	/	-0,48	/	0,21	68	-0,08	-20

Anhang F: Vermessung der Stahlzähne I/P1 bis I/P4

16_17	0	0,31	0,07	0,3	0,1	-0,31	/	-0,07	/	-0,3	/	-0,1	/	0,01	3	-0,03	-43
17_18	0	0,3	0,42	0,12	0,48	-0,3	/	-0,42	/	-0,12	/	-0,48	/	0,18	60	-0,06	-14
18_19	0	0,3	0,06	0,3	0,1	-0,3	/	-0,06	/	-0,3	/	-0,1	/	0	0	-0,04	-67
19_20	0	0,26	0,43	0,14	0,49	-0,26	/	-0,43	/	-0,14	/	-0,49	/	0,12	46	-0,06	-14
20_21	0	0,25	0,06	0,27	0,12	-0,25	/	-0,06	/	-0,27	/	-0,12	/	-0,02	-8	-0,06	-100
21_22	0	0,26	0,45	0,12	0,42	-0,26	/	-0,45	/	-0,12	/	-0,42	/	0,14	54	0,03	7
22_23	0	0,28	0,09	0,28	0,1	-0,28	/	-0,09	/	-0,28	/	-0,1	/	0	0	-0,01	-11
23_24	0	0,24	0,43	0,12	0,4	-0,24	/	-0,43	/	-0,12	/	-0,4	/	0,12	50	0,03	7
24_25	0	0,29	0,06	0,24	0,07	-0,29	/	-0,06	/	-0,24	/	-0,07	/	0,05	17	-0,01	-17
25_26	0	0,28	0,44	0,12	0,5	-0,28	/	-0,44	/	-0,12	/	-0,5	/	0,16	57	-0,06	-14
26_27	0	0,27	0,07	0,31	0,07	-0,27	/	-0,07	/	-0,31	/	-0,07	/	-0,04	15	0	0
27_28	0	0,25	0,45	0,11	0,39	-0,25	/	-0,45	/	-0,11	/	-0,39	/	0,14	56	0,06	13
28_29	0	0,28	0,09	0,27	0,13	-0,28	/	-0,09	/	-0,27	/	-0,13	/	0,01	4	-0,04	-44
29_30	0	0,27	0,48	0,12	0,43	-0,27	/	-0,48	/	-0,12	/	-0,43	/	0,15	56	0,05	10
30_31	0	0,33	0,11	0,32	0,11	-0,33	/	-0,11	/	-0,32	/	-0,11	/	0,01	3	0	0
31_32	0	0,28	0,39	0,1	0,44	-0,28	/	-0,39	/	-0,1	/	-0,44	/	0,18	64	-0,05	-13
32_33	0	0,31	0,12	0,31	0,1	-0,31	/	-0,12	/	-0,31	/	-0,1	/	0	0	0,02	17

Prüfkörper 1 u. 2 Abstand l_z

Bez.	Auto CAD	PK1		PK2		Vgl. Autocad - PK1				Vgl. Autocad - PK2				Vgl. Pk1 - PK2			
		V	H	V	H	V		H		V		H		V		H	
		mm	mm	mm	mm	mm	%	mm	%	mm	%	mm	%	mm	%	mm	%
0_2	3,46	3,54	3,48	3,64	3,5	-0,08	-2	-0,02	-1	-0,18	-5	-0,04	-1	-0,1	-3	-0,02	-1
1_3	3,46	3,49	3,48	3,59	3,47	-0,03	-1	-0,02	-1	-0,13	-4	-0,01	0	-0,1	-3	0,01	0
2_4	3,46	3,55	3,5	3,6	XX	-0,09	-3	-0,04	-1	-0,14	-4			-0,05	-1		
3_5	3,46	3,53	3,52	3,62	3,6	-0,07	-2	-0,06	-2	-0,16	-5	-0,14	-4	-0,09	-3	-0,08	-2
4_6	3,46	3,51	3,58	3,58	3,46	-0,05	-1	-0,12	-3	-0,12	-3	0	0	-0,07	-2	0,12	3
5_7	3,46	3,48	3,65	3,6	3,55	-0,02	-1	-0,19	-5	-0,14	-4	-0,09	-3	-0,12	-3	0,1	3
6_8	3,46	3,55	3,44	3,46	3,52	-0,09	-3	0,02	1	0	0	-0,06	-2	0,09	3	-0,08	-2
7_9	3,46	3,5	3,58	3,51	3,54	-0,04	-1	-0,12	-3	-0,05	-1	-0,08	-2	-0,01	0	0,04	1
8_10	3,46	3,49	3,62	3,63	3,51	-0,03	-1	-0,16	-5	-0,17	-5	-0,05	-1	-0,14	-4	0,11	3
9_11	3,46	3,52	3,46	3,52	3,41	-0,06	-2	0	0	-0,06	-2	0,05	1	0	0	0,05	1
10_12	3,46	3,53	3,51	3,52	3,55	-0,07	-2	-0,05	-1	-0,06	-2	-0,09	-3	0,01	0	-0,04	-1
11_13	3,46	3,53	3,59	3,53	3,56	-0,07	-2	-0,13	-4	-0,07	-2	-0,1	-3	0	0	0,03	1
12_14	3,46	3,57	3,6	3,54	3,6	-0,11	-3	-0,14	-4	-0,08	-2	-0,14	-4	0,03	1	0	0
13_15	3,46	3,53	3,53	3,52	3,57	-0,07	-2	-0,07	-2	-0,06	-2	-0,11	-3	0,01	0	-0,04	-1
14_16	3,46	3,59	3,51	3,59	3,5	-0,13	-4	-0,05	-1	-0,13	-4	-0,04	-1	0	0	0,01	0
15_17	3,46	3,54	3,57	3,5	3,47	-0,08	-2	-0,11	-3	-0,04	-1	-0,01	0	0,04	1	0,1	3
16_18	3,46	3,48	3,5	3,54	3,56	-0,02	-1	-0,04	-1	-0,08	-2	-0,1	-3	-0,06	-2	-0,06	-2
17_19	3,46	3,56	3,49	3,54	3,47	-0,1	-3	-0,03	-1	-0,08	-2	-0,01	0	0,02	1	0,02	1
18_20	3,46	3,59	3,52	3,4	3,57	-0,13	-4	-0,06	-2	0,06	2	-0,11	-3	0,19	5	-0,05	-1
19_21	3,46	3,6	3,51	3,52	3,54	-0,14	-4	-0,05	-1	-0,06	-2	-0,08	-2	0,08	2	-0,03	-1
20_22	3,46	3,56	3,65	3,47	3,52	-0,1	-3	-0,19	-5	-0,01	0	-0,06	-2	0,09	3	0,13	4
21_23	3,46	3,58	3,54	3,48	3,55	-0,12	-3	-0,08	-2	-0,02	-1	-0,09	-3	0,1	3	-0,01	0

Anhang F: Vermessung der Stahlzähne I/P1 bis I/P4

22_24	3,46	3,47	3,47	3,56	3,6	-0,01	0	-0,01	0	-0,1	-3	-0,14	-4	-0,09	-3	-0,13	-4
23_25	3,46	3,55	3,58	3,53	3,55	-0,09	-3	-0,12	-3	-0,07	-2	-0,09	-3	0,02	1	0,03	1
24_26	3,46	3,52	3,58	3,52	3,47	-0,06	-2	-0,12	-3	-0,06	-2	-0,01	0	0	0	0,11	3
25_27	3,46	3,52	3,53	3,57	3,44	-0,06	-2	-0,07	-2	-0,11	-3	0,02	1	-0,05	-1	0,09	3
26_28	3,46	3,51	3,59	3,56	3,54	-0,05	-1	-0,13	-4	-0,1	-3	-0,08	-2	-0,05	-1	0,05	1
27_29	3,46	3,46	3,57	3,48	3,52	0	0	-0,11	-3	-0,02	-1	-0,06	-2	-0,02	-1	0,05	1
28_30	3,46	3,53	3,44	3,42	3,49	-0,07	-2	0,02	1	0,04	1	-0,03	-1	0,11	3	-0,05	-1
29_31	3,46	3,58	3,52	3,48	3,62	-0,12	-3	-0,06	-2	-0,02	-1	-0,16	-5	0,1	3	-0,1	-3
30_32	3,46	3,52	3,51	3,52	3,54	-0,06	-2	-0,05	-1	-0,06	-2	-0,08	-2	0	0	-0,03	-1
31_33	3,46	3,52	3,64	3,5	3,49	-0,06	-2	-0,18	-5	-0,04	-1	-0,03	-1	0,02	1	0,15	4

Prüfkörper 1 u. 2 Abstand h_z

Bez.	Auto CAD	PK1		PK2		Vgl. Autocad - PK1				Vgl. Autocad - PK2				Vgl. Pk1 - PK2			
		V	H	V	H	V		H		V		H		V		H	
		mm	mm	mm	mm	mm	%	mm	%	mm	%	mm	%	mm	%	mm	%
0_2	2,5	2,52	2,89	2,5	2,72	-0,02	-1	-0,39	-16	0	0	-0,22	-9	0,02	1	0,17	6
1_3	2,5	2,5	2,77	2,53	2,69	0	0	-0,27	-11	-0,03	-1	-0,19	-8	-0,03	-1	0,08	3
2_4	2,5	2,52	2,74	2,5	2,72	-0,02	-1	-0,24	-10	0	0	-0,22	-9	0,02	1	0,02	1
3_5	2,5	2,53	2,68	2,58	2,73	-0,03	-1	-0,18	-7	-0,08	-3	-0,23	-9	-0,05	-2	-0,05	-2
4_6	2,5	2,5	2,74	2,52	2,71	0	0	-0,24	-10	-0,02	-1	-0,21	-8	-0,02	-1	0,03	1
5_7	2,5	2,53	2,68	2,58	2,73	-0,03	-1	-0,18	-7	-0,08	-3	-0,23	-9	-0,05	-2	-0,05	-2
6_8	2,5	2,51	2,77	2,55	2,66	-0,01	0	-0,27	-11	-0,05	-2	-0,16	-6	-0,04	-2	0,11	4
7_9	2,5	2,54	2,65	2,56	2,71	-0,04	-2	-0,15	-6	-0,06	-2	-0,21	-8	-0,02	-1	-0,06	-2
8_10	2,5	2,51	2,77	2,55	2,66	-0,01	0	-0,27	-11	-0,05	-2	-0,16	-6	-0,04	-2	0,11	4
9_11	2,5	2,55	2,65	2,56	2,7	-0,05	-2	-0,15	-6	-0,06	-2	-0,2	-8	-0,01	0	-0,05	-2
10_12	2,5	2,55	2,78	2,56	2,72	-0,05	-2	-0,28	-11	-0,06	-2	-0,22	-9	-0,01	0	0,06	2
11_13	2,5	2,55	2,65	2,56	2,7	-0,05	-2	-0,15	-6	-0,06	-2	-0,2	-8	-0,01	0	-0,05	-2
12_14	2,5	2,52	2,83	2,55	2,72	-0,02	-1	-0,33	-13	-0,05	-2	-0,22	-9	-0,03	-1	0,11	4
13_15	2,5	2,58	2,69	2,55	2,73	-0,08	-3	-0,19	-8	-0,05	-2	-0,23	-9	0,03	1	-0,04	-1
14_16	2,5	2,52	2,83	2,55	2,72	-0,02	-1	-0,33	-13	-0,05	-2	-0,22	-9	-0,03	-1	0,11	4
15_17	2,5	2,58	2,7	2,51	2,76	-0,08	-3	-0,2	-8	-0,01	0	-0,26	-10	0,07	3	-0,06	-2
16_18	2,5	2,51	2,84	2,57	2,72	-0,01	0	-0,34	-14	-0,07	-3	-0,22	-9	-0,06	-2	0,12	4
17_19	2,5	2,58	2,7	2,51	2,76	-0,08	-3	-0,2	-8	-0,01	0	-0,26	-10	0,07	3	-0,06	-2
18_20	2,5	2,55	2,8	2,57	2,63	-0,05	-2	-0,3	-12	-0,07	-3	-0,13	-5	-0,02	-1	0,17	6
19_21	2,5	2,56	2,75	2,55	2,71	-0,06	-2	-0,25	-10	-0,05	-2	-0,21	-8	0,01	0	0,04	1
20_22	2,5	2,55	2,8	2,57	2,63	-0,05	-2	-0,3	-12	-0,07	-3	-0,13	-5	-0,02	-1	0,17	6
21_23	2,5	2,55	2,77	2,55	2,71	-0,05	-2	-0,27	-11	-0,05	-2	-0,21	-8	0	0	0,06	2
22_24	2,5	2,54	2,8	2,51	2,72	-0,04	-2	-0,3	-12	-0,01	0	-0,22	-9	0,03	1	0,08	3
23_25	2,5	2,55	2,77	2,55	2,73	-0,05	-2	-0,27	-11	-0,05	-2	-0,23	-9	0	0	0,04	1
24_26	2,5	2,53	2,69	2,53	2,66	-0,03	-1	-0,19	-8	-0,03	-1	-0,16	-6	0	0	0,03	1
25_27	2,5	2,53	2,6	2,55	2,75	-0,03	-1	-0,1	-4	-0,05	-2	-0,25	-10	-0,02	-1	-0,15	-6
26_28	2,5	2,53	2,69	2,53	2,66	-0,03	-1	-0,19	-8	-0,03	-1	-0,16	-6	0	0	0,03	1
27_29	2,5	2,55	2,62	2,5	2,64	-0,05	-2	-0,12	-5	0	0	-0,14	-6	0,05	2	-0,02	-1
28_30	2,5	2,55	2,72	2,51	2,65	-0,05	-2	-0,22	-9	-0,01	0	-0,15	-6	0,04	2	0,07	3

Anhang F: Vermessung der Stahlzähne I/P1 bis I/P4

29_31	2,5	2,55	2,62	2,5	2,64	-0,05	-2	-0,12	-5	0	0	-0,14	-6	0,05	2	-0,02	-1
30_32	2,5	2,5	2,75	2,53	2,66	0	0	-0,25	-10	-0,03	-1	-0,16	-6	-0,03	-1	0,09	3
31_33	2,5	2,53	2,61	2,54	2,69	-0,03	-1	-0,11	-4	-0,04	-2	-0,19	-8	-0,01	0	-0,08	-3

Prüfkörper 1 u. 2 Abstand a_z

Bez.	Auto CAD	PK1		PK2		Vgl. Autocad - PK1				Vgl. Autocad - PK2				Vgl. Pk1 - PK2			
		V °	H °	V °	H °	V °	%	H °	%	V °	%	H °	%	V °	%	H °	%
0	40	42,3 7	29,4 4	43,6 7	25,5 9	-2,37	-6	10,56	26	-3,67	-9	14,41	36	-1,3	-3	3,85	13
1	40	43,5 8	26,2 2	41,2 4	25,2 7	-3,58	-9	13,78	34	-1,24	-3	14,73	37	2,34	5	0,95	4
2	40	41,3 7	27,5 9	38,5 2	22,6 3	-1,37	-3	12,41	31	1,48	4	17,37	43	2,85	7	4,96	18
3	40	39,3 5	28,5 3	41,2 1	22,8 6	0,65	2	11,47	29	-1,21	-3	17,14	43	-1,86	-5	5,67	20
4	40	38,7 4	26,7 7	37,0 1	25,6 4	1,26	3	13,23	33	2,99	7	14,36	36	1,73	4	1,13	4
5	40	39,2 3	28,8	37,9 4	24,0 2	0,77	2	11,2	28	2,06	5	15,98	40	1,29	3	4,78	17
6	40	39,3 6	33,3 7	37,8 4	24,1 4	0,64	2	6,63	17	2,16	5	15,86	40	1,52	4	9,23	28
7	40	40,7 4	27,1 8	37,8 6	25,5 3	-0,74	-2	12,82	32	2,14	5	14,47	36	2,88	7	1,65	6
8	40	39,2 7	28,5 6	40,3 9	27,3 3	0,73	2	11,44	29	-0,39	-1	12,67	32	-1,12	-3	1,23	4
9	40	39,4 6	29,2	41,1 9	22,9	0,54	1	10,8	27	-1,19	-3	17,1	43	-1,73	-4	6,3	22
10	40	39,6 5	31,7 5	37,2 6	25,8 3	0,35	1	8,25	21	2,74	7	14,17	35	2,39	6	5,92	19
11	40	39,3 8	28,0 1	38,2 6	24,8	0,62	2	11,99	30	1,74	4	15,2	38	1,12	3	3,21	11
12	40	38,1 8	29,1 6	40,2 7	23,6 2	1,82	5	10,84	27	-0,27	-1	16,38	41	-2,09	-5	5,54	19
13	40	37,6 3	27,5 9	40,6 5	26,2 3	2,37	6	12,41	31	-0,65	-2	13,77	34	-3,02	-8	1,36	5
14	40	38,6 4	26,5 9	40,6 5	26	1,36	3	13,41	34	-0,65	-2	14	35	-2,01	-5	0,59	2
15	40	39,8 5	24,4 7	41,6 8	23,6 3	0,15	0	15,53	39	-1,68	-4	16,37	41	-1,83	-5	0,84	3
16	40	41,1	26,2 5	40,8 3	23,9 2	-1,1	-3	13,75	34	-0,83	-2	16,08	40	0,27	1	2,33	9
17	40	41,1 2	25,3 1	42,3 5	22,9 1	-1,12	-3	14,69	37	-2,35	-6	17,09	43	-1,23	-3	2,4	9
18	40	40,7 2	27,9 7	42,4 7	22,6 1	-0,72	-2	12,03	30	-2,47	-6	17,39	43	-1,75	-4	5,36	19
19	40	40,1 8	24,5 7	38,5 3	23,7	-0,18	0	15,43	39	1,47	4	16,3	41	1,65	4	0,87	4
20	40	38,2 9	24,4 6	39,3 6	23,0 8	1,71	4	15,54	39	0,64	2	16,92	42	-1,07	-3	1,38	6
21	40	40,0 5	23,5 6	41,7 3	22,6 3	-0,05	0	16,44	41	-1,73	-4	17,37	43	-1,68	-4	0,93	4
22	40	38,4 9	27,7 2	40,7 8	25,1	1,51	4	12,28	31	-0,78	-2	14,9	37	-2,29	-6	2,62	9
23	40	37,4 9	29,2	40,8 3	24,0 8	2,51	6	10,8	27	-0,83	-2	15,92	40	-3,34	-9	5,12	18
24	40	38,4 2	3,47	38,3 1	22,1 8	1,58	4	36,53	91	1,69	4	17,82	45	0,11	0	-18,7	-539
25	40	38,0	22,3	38,5	26,4	1,95	5	17,67	44	1,47	4	13,56	34	-0,48	-1	-4,11	-18

Anhang F: Vermessung der Stahlzähne I/P1 bis I/P4

		5	3	3	4													
26	40	39,2 5	24,2 2	40,1 1	25,5 4	0,75	2	15,78	39	-0,11	0	14,46	36	-0,86	-2	-1,32	-5	
27	40	39,4	24,7 6	39,7 4	26,1 6	0,6	2	15,24	38	0,26	1	13,84	35	-0,34	-1	-1,4	-6	
28	40	39,4 1	31,4 4	36,6 4	23,9 1	0,59	1	8,56	21	3,36	8	16,09	40	2,77	7	7,53	24	
29	40	39,3 3	24,5 8	36,5 6	23,0 8	0,67	2	15,42	39	3,44	9	16,92	42	2,77	7	1,5	6	
30	40	40,3 7	23,1 8	38,0 4	21,0 1	-0,37	-1	16,82	42	1,96	5	18,99	47	2,33	6	2,17	9	
31	40	41,3 4	25,4 3	40,6	19,4 8	-1,34	-3	14,57	36	-0,6	-2	20,52	51	0,74	2	5,95	23	
32	40	42,0 2	26,5 5	39,9 1	22,6 8	-2,02	-5	13,45	34	0,09	0	17,32	43	2,11	5	3,87	15	
33	40	43,1 3	27,9 4	38,7 1	21,3 8	-3,13	-8	12,06	30	1,29	3	18,62	47	4,42	1 0	6,56	23	

Prüfkörper 3 u. 4 Abstand r1

Bez.	Auto CAD	PK3		PK4		Vgl. Autocad - PK3				Vgl. Autocad - PK4				Vgl. Pk3 - PK4			
		V	H	V	H	V		H		V		H		V		H	
		mm	mm	mm	mm	mm	%	mm	%	mm	%	mm	%	mm	%	mm	%
0	0,25	0,21	0,29	0,28	0,15	0,04	16	-0,04	-16	-0,03	-12	0,1	40	-0,07	-33	0,14	48
1	0,25	0,28	0,34	0,25	0,13	-0,03	-12	-0,09	-36	0	0	0,12	48	0,03	11	0,21	62
2	0,25	0,27	0,3	0,23	0,27	-0,02	-8	-0,05	-20	0,02	8	-0,02	-8	0,04	15	0,03	10
3	0,25	0,25	0,19	0,25	0,17	0	0	0,06	24	0	0	0,08	32	0	0	0,02	11
4	0,25	0,25	0,26	0,25	0,13	0	0	-0,01	-4	0	0	0,12	48	0	0	0,13	50
5	0,25	0,26	0,28	0,26	0,27	-0,01	-4	-0,03	-12	-0,01	-4	-0,02	-8	0	0	0,01	4
6	0,25	0,28	0,43	0,24	0,27	-0,03	-12	-0,18	-72	0,01	4	-0,02	-8	0,04	14	0,16	37
7	0,25	0,26	0,19	0,24	0,17	-0,01	-4	0,06	24	0,01	4	0,08	32	0,02	8	0,02	11
8	0,25	0,25	0,3	0,24	0,25	0	0	-0,05	-20	0,01	4	0	0	0,01	4	0,05	17
9	0,25	0,26	0,19	0,24	0,25	-0,01	-4	0,06	24	0,01	4	0	0	0,02	8	-0,06	-32
10	0,25	0,26	0,2	0,24	0,25	-0,01	-4	0,05	20	0,01	4	0	0	0,02	8	-0,05	-25
11	0,25	0,3	0,16	0,22	0,18	-0,05	-20	0,09	36	0,03	12	0,07	28	0,08	27	-0,02	-13
12	0,25	0,25	0,24	0,26	0,2	0	0	0,01	4	-0,01	-4	0,05	20	-0,01	-4	0,04	17
13	0,25	0,25	0,19	0,23	0,23	0	0	0,06	24	0,02	8	0,02	8	0,02	8	-0,04	-21
14	0,25	0,25	0,23	0,23	0,2	0	0	0,02	8	0,02	8	0,05	20	0,02	8	0,03	13
15	0,25	0,29	0,26	0,24	0,2	-0,04	-16	-0,01	-4	0,01	4	0,05	20	0,05	17	0,06	23
16	0,25	0,24	0,28	0,25	0,24	0,01	4	-0,03	-12	0	0	0,01	4	-0,01	-4	0,04	14
17	0,25	0,28	0,25	0,24	0,28	-0,03	-12	0	0	0,01	4	-0,03	-12	0,04	14	-0,03	-12
18	0,25	0,24	0,24	0,27	0,27	0,01	4	0,01	4	-0,02	-8	-0,02	-8	-0,03	-13	-0,03	-13
19	0,25	0,23	0,17	0,23	0,21	0,02	8	0,08	32	0,02	8	0,04	16	0	0	-0,04	-24
20	0,25	0,25	0,21	0,24	0,23	0	0	0,04	16	0,01	4	0,02	8	0,01	4	-0,02	-10
21	0,25	0,26	0,25	0,24	0,4	-0,01	-4	0	0	0,01	4	-0,15	-60	0,02	8	-0,15	-60
22	0,25	0,25	0,18	0,24	0,15	0	0	0,07	28	0,01	4	0,1	40	0,01	4	0,03	17
23	0,25	0,27	0,15	0,26	0,36	-0,02	-8	0,1	40	-0,01	-4	-0,11	-44	0,01	4	-0,21	-140

Prüfkörper 3 u. 4 Abstand r2

Bez.	Auto CAD	PK3		PK4		Vgl. Autocad - PK3				Vgl. Autocad - PK4				Vgl. Pk3 - PK4			
		V	H	V	H	V		H		V		H		V		H	
		mm	mm	mm	mm	mm	%	mm	%	mm	%	mm	%	mm	%	mm	%
0	0,25	0,22	n	0,25	0,18	0,03	12	n	n	0	0	0,07	28	-0,03	-14	n	n
1	0,25	0,3	0,36	0,28	0,21	-0,05	-20	-0,11	-44	-0,03	-12	0,04	16	0,02	7	0,15	42
2	0,25	0,26	0,38	0,24	0,12	-0,01	-4	-0,13	-52	0,01	4	0,13	52	0,02	8	0,26	68
3	0,25	0,24	0,17	0,27	0,22	0,01	4	0,08	32	-0,02	-8	0,03	12	-0,03	-13	-0,05	-29
4	0,25	0,25	0,32	0,23	0,13	0	0	-0,07	-28	0,02	8	0,12	48	0,02	8	0,19	59
5	0,25	0,31	0,21	0,25	0,16	-0,06	-24	0,04	16	0	0	0,09	36	0,06	19	0,05	24
6	0,25	0,31	0,21	0,26	0,23	-0,06	-24	0,04	16	-0,01	-4	0,02	8	0,05	16	-0,02	-10
7	0,25	0,25	0,17	0,23	0,21	0	0	0,08	32	0,02	8	0,04	16	0,02	8	-0,04	-24
8	0,25	0,25	0,16	0,21	0,15	0	0	0,09	36	0,04	16	0,1	40	0,04	16	0,01	6
9	0,25	0,21	0,14	0,25	0,27	0,04	16	0,11	44	0	0	-0,02	-8	-0,04	-19	-0,13	-93
10	0,25	0,23	0,16	0,25	0,25	0,02	8	0,09	36	0	0	0	0	-0,02	-9	-0,09	-56
11	0,25	0,26	0,2	0,25	0,21	-0,01	-4	0,05	20	0	0	0,04	16	0,01	4	-0,01	-5
12	0,25	0,26	0,16	0,25	0,19	-0,01	-4	0,09	36	0	0	0,06	24	0,01	4	-0,03	-19
13	0,25	0,24	0,2	0,26	0,2	0,01	4	0,05	20	-0,01	-4	0,05	20	-0,02	-8	0	0
14	0,25	0,21	0,14	0,24	0,15	0,04	16	0,11	44	0,01	4	0,1	40	-0,03	-14	-0,01	-7
15	0,25	0,25	0,11	0,26	0,16	0	0	0,14	56	-0,01	-4	0,09	36	-0,01	-4	-0,05	-45
16	0,25	0,22	0,16	0,26	0,2	0,03	12	0,09	36	-0,01	-4	0,05	20	-0,04	-18	-0,04	-25
17	0,25	0,26	0,14	0,26	0,12	-0,01	-4	0,11	44	-0,01	-4	0,13	52	0	0	0,02	14
18	0,25	0,24	0,15	0,26	0,16	0,01	4	0,1	40	-0,01	-4	0,09	36	-0,02	-8	-0,01	-7
19	0,25	0,29	0,15	0,25	0,25	-0,04	-16	0,1	40	0	0	0	0	0,04	14	-0,1	-67
20	0,25	0,25	0,14	0,23	0,21	0	0	0,11	44	0,02	8	0,04	16	0,02	8	-0,07	-50
21	0,25	0,22	0,15	0,26	0,23	0,03	12	0,1	40	-0,01	-4	0,02	8	-0,04	-18	-0,08	-53
22	0,25	0,34	0,12	0,25	0,14	-0,09	-36	0,13	52	0	0	0,11	44	0,09	26	-0,02	-17
23	0,25	0,22	0,3	0,24	0,16	0,03	12	-0,05	-20	0,01	4	0,09	36	-0,02	-9	0,14	47

Prüfkörper 3 u. 4 Abstand r3

Bez.	Auto CAD	PK3		PK4		Vgl. Autocad - PK3				Vgl. Autocad - PK4				Vgl. Pk3 - PK4			
		V	H	V	H	V		H		V		H		V		H	
		mm	mm	mm	mm	mm	%	mm	%	mm	%	mm	%	mm	%	mm	%
0_2	1	1,34	1,25	1,21	1,24	-0,34	-34	-0,25	-25	-0,21	-21	-0,24	-24	0,13	10	0,01	1
1_3	1	1,2	1,09	1,21	1,2	-0,2	-20	-0,09	-9	-0,21	-21	-0,2	-20	-0,01	-1	-0,11	-10
2_4	1	1,18	1,24	1,15	1,16	-0,18	-18	-0,24	-24	-0,15	-15	-0,16	-16	0,03	3	0,08	6
3_5	1	1,24	1,2	1,12	1,19	-0,24	-24	-0,2	-20	-0,12	-12	-0,19	-19	0,12	10	0,01	1
4_6	1	1,25	1,27	1,14	1,2	-0,25	-25	-0,27	-27	-0,14	-14	-0,2	-20	0,11	9	0,07	6
5_7	1	1,22	1,2	1,18	1,22	-0,22	-22	-0,2	-20	-0,18	-18	-0,22	-22	0,04	3	-0,02	-2
6_8	1	1,27	1,22	1,09	1,19	-0,27	-27	-0,22	-22	-0,09	-9	-0,19	-19	0,18	14	0,03	2
7_9	1	1,23	1,18	1,15	1,18	-0,23	-23	-0,18	-18	-0,15	-15	-0,18	-18	0,08	7	0	0
8_10	1	1,23	1,23	1,17	1,21	-0,23	-23	-0,23	-23	-0,17	-17	-0,21	-21	0,06	5	0,02	2

Anhang F: Vermessung der Stahlzähne I/P1 bis I/P4

9_11	1	1,22	1,19	1,22	1,21	-0,22	-22	-0,19	-19	-0,22	-22	-0,21	-21	0	0	-0,02	-2
10_12	1	1,24	1,23	1,11	1,16	-0,24	-24	-0,23	-23	-0,11	-11	-0,16	-16	0,13	10	0,07	6
11_13	1	1,23	1,18	1,18	1,12	-0,23	-23	-0,18	-18	-0,18	-18	-0,12	-12	0,05	4	0,06	5
12_14	1	1,23	1,27	1,18	1,17	-0,23	-23	-0,27	-27	-0,18	-18	-0,17	-17	0,05	4	0,1	8
13_15	1	1,21	1,17	1,21	1,19	-0,21	-21	-0,17	-17	-0,21	-21	-0,19	-19	0	0	-0,02	-2
14_16	1	1,29	1,27	1,21	1,15	-0,29	-29	-0,27	-27	-0,21	-21	-0,15	-15	0,08	6	0,12	9
15_17	1	1,27	1,19	1,14	1,14	-0,27	-27	-0,19	-19	-0,14	-14	-0,14	-14	0,13	10	0,05	4
16_18	1	1,23	1,22	1,23	1,17	-0,23	-23	-0,22	-22	-0,23	-23	-0,17	-17	0	0	0,05	4
17_19	1	1,22	1,17	1,18	1,16	-0,22	-22	-0,17	-17	-0,18	-18	-0,16	-16	0,04	3	0,01	1
18_20	1	1,2	1,25	1,14	1,22	-0,2	-20	-0,25	-25	-0,14	-14	-0,22	-22	0,06	5	0,03	2
19_21	1	1,22	1,15	1,14	1,14	-0,22	-22	-0,15	-15	-0,14	-14	-0,14	-14	0,08	7	0,01	1
20_22	1	1,21	1,26	1,18	1,21	-0,21	-21	-0,26	-26	-0,18	-18	-0,21	-21	0,03	2	0,05	4
21_23	1	1,22	1,21	1,16	1,11	-0,22	-22	-0,21	-21	-0,16	-16	-0,11	-11	0,06	5	0,1	8

Prüfkörper 3 u. 4 Abstand a

Bez.	Auto CAD	PK3		PK4		Vgl. Autocad - PK3				Vgl. Autocad - PK4				Vgl. Pk3 - PK4			
		V	H	V	H	V		H		V		H		V		H	
						mm	%	mm	%	mm	%	mm	%	mm	%	mm	%
0_1	0	0,2	0,15	0,27	0,14	-0,2	/	-0,15	/	-0,27	/	-0,14	/	-0,07	-35	0,01	7
1_2	0	0,14	0,11	0,16	0,12	-0,14	/	-0,11	/	-0,16	/	-0,12	/	-0,02	-14	-0,01	-9
2_3	0	0,2	0,13	0,18	0,08	-0,2	/	-0,13	/	-0,18	/	-0,08	/	0,02	10	0,05	38
3_4	0	0,18	0,15	0,14	0,11	-0,18	/	-0,15	/	-0,14	/	-0,11	/	0,04	22	0,04	27
4_5	0	0,16	0,09	0,16	0,11	-0,16	/	-0,09	/	-0,16	/	-0,11	/	0	0	-0,02	-22
5_6	0	0,13	0,13	0,18	0,09	-0,13	/	-0,13	/	-0,18	/	-0,09	/	-0,05	-38	0,04	31
6_7	0	0,17	0,12	0,18	0,08	-0,17	/	-0,12	/	-0,18	/	-0,08	/	-0,01	-6	0,04	33
7_8	0	0,17	0,11	0,16	0,13	-0,17	/	-0,11	/	-0,16	/	-0,13	/	0,01	6	-0,02	-18
8_9	0	0,17	0,08	0,2	0,12	-0,17	/	-0,08	/	-0,2	/	-0,12	/	-0,03	-18	-0,04	-50
9_10	0	0,16	0,08	0,15	0,12	-0,16	/	-0,08	/	-0,15	/	-0,12	/	0,01	6	-0,04	-50
10_11	0	0,2	0,11	0,19	0,11	-0,2	/	-0,11	/	-0,19	/	-0,11	/	0,01	5	0	0
11_12	0	0,18	0,1	0,17	0,1	-0,18	/	-0,1	/	-0,17	/	-0,1	/	0,01	6	0	0
12_13	0	0,19	0,12	0,22	0,11	-0,19	/	-0,12	/	-0,22	/	-0,11	/	-0,03	-16	0,01	8
13_14	0	0,16	0,1	0,17	0,1	-0,16	/	-0,1	/	-0,17	/	-0,1	/	-0,01	-6	0	0
14_15	0	0,2	0,12	0,15	0,1	-0,2	/	-0,12	/	-0,15	/	-0,1	/	0,05	25	0,02	17
15_16	0	0,17	0,12	0,16	0,13	-0,17	/	-0,12	/	-0,16	/	-0,13	/	0,01	6	-0,01	-8
16_17	0	0,22	0,1	0,18	0,09	-0,22	/	-0,1	/	-0,18	/	-0,09	/	0,04	18	0,01	10
17_18	0	0,17	0,15	0,18	0,11	-0,17	/	-0,15	/	-0,18	/	-0,11	/	-0,01	-6	0,04	27
18_19	0	0,21	0,09	0,19	0,09	-0,21	/	-0,09	/	-0,19	/	-0,09	/	0,02	10	0	0
19_20	0	0,18	0,07	0,18	0,09	-0,18	/	-0,07	/	-0,18	/	-0,09	/	0	0	-0,02	-29
20_21	0	0,19	0,13	0,17	0,12	-0,19	/	-0,13	/	-0,17	/	-0,12	/	0,02	11	0,01	8
21_22	0	0,16	0,13	0,16	0,12	-0,16	/	-0,13	/	-0,16	/	-0,12	/	0	0	0,01	8
22_23	0	0,2	0,14	0,17	0,08	-0,2	/	-0,14	/	-0,17	/	-0,08	/	0,03	15	0,06	43

Prüfkörper 3 u. 4 Abstand l_z

Bez.	Auto CAD	PK3		PK4		Vgl. Autocad - PK3				Vgl. Autocad - PK4				Vgl. Pk3 - PK4			
		V	H	V	H	V		H		V		H		V		H	
		mm	mm	mm	mm	mm	%	mm	%	mm	%	mm	%	mm	%	mm	%
0_2	5	5,05	5,06	5,22	5,09	-0,05	-1	-0,06	-1	-0,22	-4	-0,09	-2	-0,17	-3	-0,03	-1
1_3	5	5,03	5	5,11	5,01	-0,03	-1	0	0	-0,11	-2	-0,01	0	-0,08	-2	-0,01	0
2_4	5	5,16	5,19	5,03	4,95	-0,16	-3	-0,19	-4	-0,03	-1	0,05	1	0,13	3	0,24	5
3_5	5	5,03	4,99	5,04	5,08	-0,03	-1	0,01	0	-0,04	-1	-0,08	-2	-0,01	0	-0,09	-2
4_6	5	4,99	5,18	5,06	5,02	0,01	0	-0,18	-4	-0,06	-1	-0,02	0	-0,07	-1	0,16	3
5_7	5	4,94	5,11	5,09	5,08	0,06	1	-0,11	-2	-0,09	-2	-0,08	-2	-0,15	-3	0,03	1
6_8	5	5	5,07	5,13	5,15	0	0	-0,07	-1	-0,13	-3	-0,15	-3	-0,13	-3	-0,08	-2
7_9	5	5,01	5,13	5,07	5,12	-0,01	0	-0,13	-3	-0,07	-1	-0,12	-2	-0,06	-1	0,01	0
8_10	5	5,09	5,12	5,11	5,11	-0,09	-2	-0,12	-2	-0,11	-2	-0,11	-2	-0,02	0	0,01	0
9_11	5	4,96	5,09	5,14	5,1	0,04	1	-0,09	-2	-0,14	-3	-0,1	-2	-0,18	-4	-0,01	0
10_12	5	5,05	5,07	5	5,09	-0,05	-1	-0,07	-1	0	0	-0,09	-2	0,05	1	-0,02	0
11_13	5	5,04	5,1	5,07	5,07	-0,04	-1	-0,1	-2	-0,07	-1	-0,07	-1	-0,03	-1	0,03	1
12_14	5	5,07	5,12	5,11	5,1	-0,07	-1	-0,12	-2	-0,11	-2	-0,1	-2	-0,04	-1	0,02	0
13_15	5	4,94	5,16	5,08	5,05	0,06	1	-0,16	-3	-0,08	-2	-0,05	-1	-0,14	-3	0,11	2
14_16	5	5,09	5,04	5,17	5,17	-0,09	-2	-0,04	-1	-0,17	-3	-0,17	-3	-0,08	-2	-0,13	-3
15_17	5	5,11	5,05	5,09	5,07	-0,11	-2	-0,05	-1	-0,09	-2	-0,07	-1	0,02	0	-0,02	0
16_18	5	5	5,07	5,02	5,04	0	0	-0,07	-1	-0,02	0	-0,04	-1	-0,02	0	0,03	1
17_19	5	4,94	5,02	4,94	5,12	0,06	1	-0,02	0	0,06	1	-0,12	-2	0	0	-0,1	-2
18_20	5	5,08	5,16	5,19	5,07	-0,08	-2	-0,16	-3	-0,19	-4	-0,07	-1	-0,11	-2	0,09	2
19_21	5	4,99	5,03	5,11	5,01	0,01	0	-0,03	-1	-0,11	-2	-0,01	0	-0,12	-2	0,02	0
20_22	5	5,08	5,16	5	5,13	-0,08	-2	-0,16	-3	0	0	-0,13	-3	0,08	2	0,03	1
21_23	5	5,03	4,98	5,14	4,89	-0,03	-1	0,02	0	-0,14	-3	0,11	2	-0,11	-2	0,09	2

Prüfkörper 3 u. 4 Abstand h_z

Bez.	Auto CAD	PK3		PK4		Vgl. Autocad - PK3				Vgl. Autocad - PK4				Vgl. Pk3 - PK4			
		V	H	V	H	V		H		V		H		V		H	
		mm	mm	mm	mm	mm	%	mm	%	mm	%	mm	%	mm	%	mm	%
0_2	2,36	2,31	2,68	2,3	2,67	0,05	2	-0,32	-14	0,06	3	-0,31	-13	0,01	0	0,01	0
1_3	2,36	2,36	2,72	2,27	2,64	0	0	-0,36	-15	0,09	4	-0,28	-12	0,09	4	0,08	3
2_4	2,36	2,46	2,72	2,32	2,7	-0,1	-4	-0,36	-15	0,04	2	-0,34	-14	0,14	6	0,02	1
3_5	2,36	2,48	2,7	2,27	2,68	-0,12	-5	-0,34	-14	0,09	4	-0,32	-14	0,21	8	0,02	1
4_6	2,36	2,49	2,77	2,27	2,71	-0,13	-6	-0,41	-17	0,09	4	-0,35	-15	0,22	9	0,06	2
5_7	2,36	2,5	2,7	2,29	2,7	-0,14	-6	-0,34	-14	0,07	3	-0,34	-14	0,21	8	0	0
6_8	2,36	2,49	2,7	2,28	2,75	-0,13	-6	-0,34	-14	0,08	3	-0,39	-17	0,21	8	-0,05	-2
7_9	2,36	2,46	2,72	2,31	2,69	-0,1	-4	-0,36	-15	0,05	2	-0,33	-14	0,15	6	0,03	1
8_10	2,36	2,46	2,68	2,3	2,71	-0,1	-4	-0,32	-14	0,06	3	-0,35	-15	0,16	7	-0,03	-1
9_11	2,36	2,48	2,71	2,36	2,68	-0,12	-5	-0,35	-15	0	0	-0,32	-14	0,12	5	0,03	1
10_12	2,36	2,44	2,7	2,26	2,67	-0,08	-3	-0,34	-14	0,1	4	-0,31	-13	0,18	7	0,03	1

Anhang F: Vermessung der Stahlzähne I/P1 bis I/P4

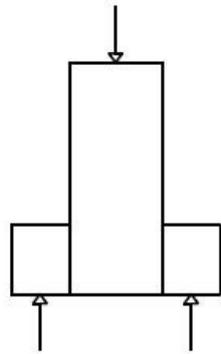
11_13	2,36	2,48	2,73	2,29	2,69	-0,12	-5	-0,37	-16	0,07	3	-0,33	-14	0,19	8	0,04	1
12_14	2,36	2,52	2,69	2,29	2,7	-0,16	-7	-0,33	-14	0,07	3	-0,34	-14	0,23	9	-0,01	0
13_15	2,36	2,49	2,76	2,26	2,68	-0,13	-6	-0,4	-17	0,1	4	-0,32	-14	0,23	9	0,08	3
14_16	2,36	2,48	2,71	2,21	2,68	-0,12	-5	-0,35	-15	0,15	6	-0,32	-14	0,27	11	0,03	1
15_17	2,36	2,48	2,77	2,26	2,66	-0,12	-5	-0,41	-17	0,1	4	-0,3	-13	0,22	9	0,11	4
16_18	2,36	2,52	2,71	2,27	2,73	-0,16	-7	-0,35	-15	0,09	4	-0,37	-16	0,25	10	-0,02	-1
17_19	2,36	2,49	2,74	2,22	2,66	-0,13	-6	-0,38	-16	0,14	6	-0,3	-13	0,27	11	0,08	3
18_20	2,36	2,48	2,73	2,25	2,72	-0,12	-5	-0,37	-16	0,11	5	-0,36	-15	0,23	9	0,01	0
19_21	2,36	2,49	2,73	2,29	2,69	-0,13	-6	-0,37	-16	0,07	3	-0,33	-14	0,2	8	0,04	1
20_22	2,36	2,47	2,67	2,25	2,68	-0,11	-5	-0,31	-13	0,11	5	-0,32	-14	0,22	9	-0,01	0
21_23	2,36	2,48	2,72	2,29	2,71	-0,12	-5	-0,36	-15	0,07	3	-0,35	-15	0,19	8	0,01	0

Prüfkörper 3 u. 4 Abstand a_z

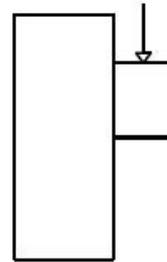
Bez.	Auto CAD	PK3		PK4		Vgl. Autocad - PK3				Vgl. Autocad - PK4				Vgl. Pk3 - PK4			
		V	H	V	H	V		H		V		H		V		H	
		°	°	°	°	°	%	°	%	°	%	°	%	°	%	°	%
0	40	38,3	27,33	40,66	36,98	1,7	4	12,67	32	-0,66	-2	3,02	8	-2,36	-6	-9,65	-35
1	40	41,92	24,89	40,38	25,35	-1,92	-5	15,11	38	-0,38	-1	14,65	37	1,54	4	-0,46	-2
2	40	41,14	24,51	41,15	25,28	-1,14	-3	15,49	39	-1,15	-3	14,72	37	-0,01	0	-0,77	-3
3	40	41,93	25,29	41,94	27,96	-1,93	-5	14,71	37	-1,94	-5	12,04	30	-0,01	0	-2,67	-11
4	40	40,56	19,09	43,84	26,95	-0,56	-1	20,91	52	-3,84	-10	13,05	33	-3,28	-8	-7,86	-41
5	40	38,9	20,27	43,9	23,59	1,1	3	19,73	49	-3,9	-10	16,41	41	-5	-13	-3,32	-16
6	40	39,44	21,8	43,7	22,66	0,56	1	18,2	46	-3,7	-9	17,34	43	-4,26	-11	-0,86	-4
7	40	40,86	22,4	43,89	20,51	-0,86	-2	17,6	44	-3,89	-10	19,49	49	-3,03	-7	1,89	8
8	40	38,53	23,08	38,97	23,82	1,47	4	16,92	42	1,03	3	16,18	40	-0,44	-1	-0,74	-3
9	40	39,04	21,54	42,63	25,27	0,96	2	18,46	46	-2,63	-7	14,73	37	-3,59	-9	-3,73	-17
10	40	41,91	23,58	41,88	26,12	-1,91	-5	16,42	41	-1,88	-5	13,88	35	0,03	0	-2,54	-11
11	40	43,52	20,76	43,6	25,1	-3,52	-9	19,24	48	-3,6	-9	14,9	37	-0,08	0	-4,34	-21
12	40	36,15	23,72	39,73	21,66	3,85	10	16,28	41	0,27	1	18,34	46	-3,58	-10	2,06	9
13	40	37,45	23,99	41,06	21,25	2,55	6	16,01	40	-1,06	-3	18,75	47	-3,61	-10	2,74	11
14	40	41,09	21,16	42,71	22,81	-1,09	-3	18,84	47	-2,71	-7	17,19	43	-1,62	-4	-1,65	-8
15	40	41,59	22,82	41,34	24,8	-1,59	-4	17,18	43	-1,34	-3	15,2	38	0,25	1	-1,98	-9
16	40	39,14	23,28	42,84	27,02	0,86	2	16,72	42	-2,84	-7	12,98	32	-3,7	-9	-3,74	-16
17	40	40,79	25,48	42,76	27,72	-0,79	-2	14,52	36	-2,76	-7	12,28	31	-1,97	-5	-2,24	-9
18	40	41,39	24,49	39,6	26,76	-1,39	-3	15,51	39	0,4	1	13,24	33	1,79	4	-2,27	-9
19	40	43,73	22,45	40,8	26,22	-3,73	-9	17,55	44	-0,8	-2	13,78	34	2,93	7	-3,77	-17
20	40	41,31	23,92	38,59	28,6	-1,31	-3	16,08	40	1,41	4	11,4	29	2,72	7	-4,68	-20
21	40	41,62	22,8	41,06	23,51	-1,62	-4	17,2	43	-1,06	-3	16,49	41	0,56	1	-0,71	-3
22	40	41,95	20,89	40,09	24,95	-1,95	-5	19,11	48	-0,09	0	15,05	38	1,86	4	-4,06	-19
23	40	43,13	20,87	39,95	26,91	-3,13	-8	19,13	48	0,05	0	13,09	33	3,18	7	-6,04	-29

Anhang G: Versuchsdatenbank

Versuchsaufbauten



Versuchsaufbau 1



Versuchsaufbau 2

Es wird zwischen einen Versuchsaufbau mit zwei Konsolen und einen Versuchsaufbau mit einer Konsole unterschieden und bei den angegebenen Versuchen mit „1“ und „2“ vermerkt. Die Versuchsdatenbank soll dazu beitragen Traglasten modularer Konsolen besser einschätzen zu können indem diese mit denen aus monolithischen Konstruktionen verglichen werden. Die Versuchsdatenbank hat keinen Anspruch auf Vollständigkeit.

Versuchsdatenbank

Anhang G: Versuchsdatenbank

Autor	Versuchsaufbau	Bezeichnung	Abmessungen	Betonfestigkeit	Fasern	Anschluss	Herstellung	Vorspannung	Versagen	Bruchlast
Kritz/Raths	1	1	110/30/100	29,5	Nein	Monolithisch	sofort	Nein	Druckstrebe	1500/2
		2	110/30/100	33,2	Nein	Monolithisch	sofort	Nein	Druckstrebe	1425/2
		3	110/30/93	29,1	Nein	Monolithisch	sofort	Nein	Druckstrebe	1275/2
Niedenhoff	2	M1/A	47,5/20/80*0,7	22,5	Nein	Monolithisch	sofort	Nein	Druckstrebe	550
		M1/B1	47,5/20/80*0,7	22,5	Nein	Monolithisch	sofort	Nein	Druckstrebe	660
		M1/B2	47,5/20/80*0,7	22,5	Nein	Monolithisch	sofort	Nein	Druckstrebe	660
		M2/A	76/20/80	22,5	Nein	Monolithisch	sofort	Nein	Druckstrebe	650
		M2/B1	60/20/80	22,5	Nein	Monolithisch	sofort	Nein	Druckstrebe	630
		M2/B2	60/20/80	22,5	Nein	Monolithisch	sofort	Nein	Druckstrebe	585
		M2/B3	50/20/80	22,5	Nein	Monolithisch	sofort	Nein	Druckstrebe	740
		M3/A	50/20/46,2*0,7	22,5	Nein	Monolithisch	sofort	Nein	Druckstrebe	270
		M3/B	50/20/46,2*0,7	22,5	Nein	Monolithisch	sofort	Nein	Druckstrebe	270
		M3/C	50/20/46,2*0,7	22,5	Nein	Monolithisch	sofort	Nein	Druckstrebe	285
		M4/A	50/20/46,2	22,5	Nein	Monolithisch	sofort	Nein	Druckstrebe	275
		M4/B	50/20/46,2	22,5	Nein	Monolithisch	sofort	Nein	Druckstrebe	245
Chakrabarti	1	TA-1	152/206/228	28,96	Nein	Monolithisch	sofort	Nein	Druckstrebe	323/2
		TB-1	152/206/228	28,50	Nein	Monolithisch	sofort	Nein	Druckstrebe	334/2
		TA-2	152/206/NA	28,27	Nein	Monolithisch	sofort	Nein	Druckstrebe	334/2
		TB-2	152/206/NA	28,06	Nein	Monolithisch	sofort	Nein	Druckstrebe	334/2
		TA-3	152/206/228	34,64	Nein	Monolithisch	sofort	Nein	Druckstrebe	356/2
		TB-3	152/206/228	33,64	Nein	Monolithisch	sofort	Nein	Druckstrebe	361/2
		TA-4	152/206/NA	34,86	Nein	Monolithisch	sofort	Nein	Druckstrebe	383/2
		TB-4	152/206/NA	33,64	Nein	Monolithisch	sofort	Nein	Druckstrebe	379/2
		SA-1	152/206/228	34,6	Nein	Monolithisch	sofort	Gewindestab	Druckstrebe	267/2
		SA-2	152/206/228	33,9	Nein	Monolithisch	sofort	Gewindestab	Druckstrebe	267/2
		SA-3	152/206/228	33,2	Nein	Monolithisch	sofort	Gewindestab	Druckstrebe	278/2
		SB-1	152/206/228	56,4	Nein	Monolithisch	sofort	Gewindestab	Druckstrebe	267/2
		SB-2	152/206/228	65,7	Nein	Monolithisch	sofort	Gewindestab	Druckstrebe	434/2
		SB-3	152/206/228	55,3	Nein	Monolithisch	sofort	Gewindestab	Druckstrebe	423/2
		SC-1	152/206/228	37,1	Nein	Monolithisch	sofort	Gewindestab	Druckstrebe	367/2
SC-2	152/206/228	38,1	Nein	Monolithisch	sofort	Gewindestab	Druckstrebe	423/2		
SC-3	152/206/228	41,5	Nein	Monolithisch	sofort	Gewindestab	Druckstrebe	434/2		
Abdul Wahab	1	A1	250/150/360*0,7	21,7	Nein	Monolithisch	sofort	Nein	Druckstrebe	187/2
		A2	250/150/360*0,7	25,8	0,5%	Monolithisch	sofort	Nein	Druckstrebe	226/2
		A3	250/150/360*0,7	34,5	1,0%	Monolithisch	sofort	Nein	Druckstrebe	262/2

Fattuhi	1	A4	250/150/360*0,7	35,7	1,0%	Monolithisch	sofort	Nein	Druckstrebe	314/2
		T1	200/150/150	50,2	Nein	Monolithisch	sofort	Nein	Diagonalbruch	94
		T2	200/150/150	50,2	Nein	Monolithisch	sofort	Nein	Abscheren	146
		T3	200/150/150	47,9	0,7	Monolithisch	sofort	Nein	Abscheren	133
		T4	200/150/150	55,9	1,4%	Monolithisch	sofort	Nein	Biegung	143
		T5	200/150/150	57,4	2,1	Monolithisch	sofort	Nein	Biegung	143
		T6	200/150/150	52,5	Nein	Monolithisch	sofort	Nein	Diagonalbruch	137
		T7	200/150/150	48,1	Nein	Monolithisch	sofort	Nein	Abscheren	157
		T8	200/150/150	52,5	Nein	Monolithisch	sofort	Nein	Abscheren	189
		T9	200/150/150	48,1	Nein	Monolithisch	sofort	Nein	Abscheren	154
		T10	200/150/150	47,9	0,7%	Monolithisch	sofort	Nein	Abscheren	138
		T11	200/150/150	55,9	1,4%	Monolithisch	sofort	Nein	Spannungsversagen	161
		T12	200/150/150	57,4	2,1%	Monolithisch	sofort	Nein	Biegung	172
		T13	200/150/150	59	Nein	Monolithisch	sofort	Nein	Biegung	24
T14	200/150/150	59	Nein	Monolithisch	sofort	Nein	Biegung	20		
Foster	1	SA1	400/150/800*0,7	87	Nein	Monolithisch	sofort	Nein	Traglast	1200/2
		SA2	400/150/800*0,7	87	Nein	Monolithisch	sofort	Nein	Traglast	1300/2
		SA3	400/150/800*0,7	92	Nein	Monolithisch	sofort	Nein	Spannungsversagen	860/2
		SA4	400/150/800*0,7	92	Nein	Monolithisch	sofort	Nein	Druckstrebe	1500/2
		SB1	400/150/800*0,7	56	Nein	Monolithisch	sofort	Nein	Traglast	1000/2
		SB2	400/150/800*0,7	56	Nein	Monolithisch	sofort	Nein	Diagonalbruch	1200/2
		SC1-1	425/150/700*0,7	90	Nein	Monolithisch	sofort	Nein	Verankerung	-
		SC1-2	425/150/700*0,7	90	Nein	Monolithisch	sofort	Nein	Diagonalbruch	950/2
		SC1-3	425/150/700*0,7	90	Nein	Monolithisch	sofort	Nein	Spannungsversagen	700/2
		SC1-4	425/150/700*0,7	90	Nein	Monolithisch	sofort	Nein	Spannungsversagen	470/2
		SC2-1	425/150/700*0,7	62	Nein	Monolithisch	sofort	Nein	Druckstrebe	980/2
		SC2-2	425/150/700*0,7	62	Nein	Monolithisch	sofort	Nein	Diagonalbruch	700/2
		SC2-3	425/150/700*0,7	62	Nein	Monolithisch	sofort	Nein	Spannungsversagen	580/2
		SC2-4	425/150/700*0,7	62	Nein	Monolithisch	sofort	Nein	Diagonalbruch	490/2
		SD1		95	Nein	Monolithisch	sofort	Nein	Druckstrebe	1000/2
		SD2		95	Nein	Monolithisch	sofort	Nein	Druckstrebe	1000/2
		PA1	400/150/600	53	Nein	Monolithisch	sofort	Gewindestab	Diagonalbruch	550/2
		PA2	400/150/600	53	Nein	Monolithisch	sofort	Gewindestab	Diagonalbruch	800/2
		PB1	400/150/600	105	Nein	Monolithisch	sofort	Gewindestab	Diagonalbruch	1180/2
		PB2	400/150/600	105	Nein	Monolithisch	sofort	Gewindestab	Druckstrebe	1150/2
PC1	300/150/600	53	Nein	Monolithisch	sofort	Gewindestab	Diagonalbruch	650/2		
PC2	300/150/600	53	Nein	Monolithisch	sofort	Gewindestab	Druckstrebe	1040/2		

		PD1	300/150/600	71	Nein	Monolithisch	sofort	Gewindestab	Vorzeitiges Versagen	540/2
		PD2	300/150/600	71	Nein	Monolithisch	sofort	Gewindestab	Druckstrebe	960/2
		PE1	550/150/600	71	Nein	Monolithisch	sofort	Gewindestab	Diagonalbruch	680/2
		PE2	550/150/600	71	Nein	Monolithisch	sofort	Gewindestab	Druckstrebe	710/2
		PF1	300/150/600	71	Nein	Monolithisch	sofort	Gewindestab	Spannungsversagen	750/2
		PF2	300/150/600	105	Nein	Monolithisch	sofort	Gewindestab	Spannungsversagen	1050/2
		PG1	450/150/600	45	Nein	Monolithisch	sofort	Gewindestab	Druckstrebe	674/2
		PG2	450/150/600	94	Nein	Monolithisch	sofort	Gewindestab	Druckstrebe	1050/2
Fattuhi	1	19	200/150/150	38,6	1,75%	Monolithisch	sofort	Nein	-	-
		20	200/150/150	38,6	1,75%	Monolithisch	sofort	Nein	Biegung	126
		21	200/150/150	37	1,5%	Monolithisch	sofort	Nein	Abscheren	118
		22	200/150/150	37	1,5%	Monolithisch	sofort	Nein	Biegung	109
		23	200/150/150	33,8	2,0%	Monolithisch	sofort	Nein	Biegung	127
		24	200/150/150	33,8	2,0%	Monolithisch	sofort	Nein	Biegung	132
		25	200/150/150	37,2	0	Monolithisch	sofort	Nein	Diagonalbruch	109
		26	200/150/150	37,2	0	Monolithisch	sofort	Nein	Abscheren	113
		27	200/150/150	42,3	2,5%	Monolithisch	sofort	Nein	Biegung	172
		28	200/150/150	42,3	2,5%	Monolithisch	sofort	Nein	Biegung	174
		29	200/150/150	37,3	1,0%	Monolithisch	sofort	Nein	Biegung	100
		30	200/150/150	37,3	1,0%	Monolithisch	sofort	Nein	Biegung	87
		31	200/150/150	40,6	2,0%	Monolithisch	sofort	Nein	Biegung	120
		32	200/150/150	40,6	2,0%	Monolithisch	sofort	Nein	Biegung	133
		33	200/155/150	40	Nein	Monolithisch	sofort	Nein	Diagonalbruch	91
		34	200/150/150	40	Nein	Monolithisch	sofort	Nein	Diagonalbruch	114
		35	200/150/150	38,7	1,5%	Monolithisch	sofort	Nein	Abscheren	125
		36	200/150/150	38,7	1,5%	Monolithisch	sofort	Nein	Biegung	124
		37	200/150/150	39,6	2,0%	Monolithisch	sofort	Nein	Biegung	140
		38	200/150/150	39,6	2,0%	Monolithisch	sofort	Nein	Biegung	74
		39	200/150/150	38,7	2,25%	Monolithisch	sofort	Nein	Biegung	145
		40	200/150/150	38,7	2,25%	Monolithisch	sofort	Nein	Abscheren	142
		41	200/150/150	35,9	Nein	Monolithisch	sofort	Nein	Diagonalbruch	98
		42	200/150/150	35,9	Nein	Monolithisch	sofort	Nein	Diagonalbruch	-
		43	200/150/150	35,4	1,5%	Monolithisch	sofort	Nein	Abscheren	-
		44	200/150/150	35,4	1,5%	Monolithisch	sofort	Nein	Abscheren	110
		45	200/150/150	34,8	1,0%	Monolithisch	sofort	Nein	Diagonalbruch	120
		46	200/150/150	34,8	1,0%	Monolithisch	sofort	Nein	Biegung	75

		47	200/150/150	35,7	2,0%	Monolithisch	sofort	Nein	Abscheren	-
		48	200/155,5/148,2	35,7	2,0%	Monolithisch	sofort	Nein	Biegung	100
		49	200/150/150	37,6	2,5%	Monolithisch	sofort	Nein	Biegung	165
		50	200/150/150	37,6	2,5%	Monolithisch	sofort	Nein	Abscheren	-
Hegger	1	RH 1	300/300/300	32	Nein	Monolithisch	sofort	Nein	Druckstrebe	-
		RH 2	300/300/300	32	Nein	Monolithisch	sofort	Nein	Druckstrebe	-
		RH 3	300/300/300	26	Nein	Monolithisch	sofort	Nein	Druckstrebe	-
		RH 4	300/300/300	40	Nein	Monolithisch	sofort	Nein	Druckstrebe	-
		RH 5	300/300/300	50,5	Nein	Monolithisch	sofort	Nein	Druckstrebe	-
		RH 6	300/300/300	50,5	Nein	Monolithisch	sofort	Nein	Druckstrebe	-
		KH 1	300/300/300	26,7	Nein	Modular	nachträglich	Nein	Druckstrebe	450
		KH 1-II	300/300/300	26,7	Nein	Modular	nachträglich	Nein	Druckstrebe	440
		KH 2	300/300/300	38,4	Nein	Modular	nachträglich	Nein	Druckstrebe	790
		KH 3	300/300/300	25,7	Nein	Modular	nachträglich	Nein	Druckstrebe	510
		KH 4	300/300/300	22,2	Nein	Modular	nachträglich	Nein	Druckstrebe	230
		KH 4-II	300/300/300	22,2	Nein	Modular	nachträglich	Nein	Druckstrebe	430
Eibl/Zeller	1	K1	Ka./300/690	29	Nein	Monolithisch	sofort	Nein	Horizontalbügel	948
		K2	Ka./300/690	29	Nein	Monolithisch	sofort	Nein	Horizontalbügel	1000
		K3	Ka./300/690	27,1	Nein	Monolithisch	sofort	Nein	Diagonalbruch	455
		K4	Ka./300/690	27,1	Nein	Monolithisch	sofort	Nein	Biegezugbruch	683
Birkle	1	1	310/150/260	49	Nein	Monolithisch	sofort	Nein	Druckstrebe	540/2
		2	310/150/260	49	Nein	Monolithisch	sofort	Nein	Druckstrebe	596/2
		3	310/150/260	20	Nein	Monolithisch	sofort	Nein	Druckstrebe	402/2
		4	310/150/260	20	Nein	Monolithisch	sofort	Nein	Druckstrebe	437/2
		5	310/150/260	24	Nein	Monolithisch	sofort	Nein	Druckstrebe	412/2
		6	310/150/260	24	Nein	Monolithisch	sofort	Nein	Druckstrebe	462/2
Mehmel/ Freitag	1	I, 1	600/400/650	21,2	Nein	Monolithisch	sofort	Nein	Schrägbügel gerissen	740/2
		I, 2	600/400/650	22,6	Nein	Monolithisch	sofort	Nein	Druckstrebe	934/2
		I, 3	600/400/650	22,2	Nein	Monolithisch	sofort	Nein	Druckstrebe	1135/2
		II, 1	600/400/650*0,7	22,2	Nein	Monolithisch	sofort	Nein	Schrägbügel eingeschnürt	700/2
		II, 2	600/400/650*0,7	21,8	Nein	Monolithisch	sofort	Nein	Druckstrebe	785/2
		II, 3	600/400/650*0,7	20,2	Nein	Monolithisch	sofort	Nein	Verankerungsbruch	840/2
		III, 1	600/400/650	20,5	Nein	Monolithisch	sofort	Nein	Druckstrebe	900/2
		III, 2	600/400/650	22,0	Nein	Monolithisch	sofort	Nein	Druckstrebe	768/2
		III, 3	600/400/650	21,8	Nein	Monolithisch	sofort	Nein	Druckstrebe	835/2
		IV, 1	600/400/650*0,7	20,0	Nein	Monolithisch	sofort	Nein	Druckstrebe	560/2

		IV, 2	600/400/650*0,7	18,7	Nein	Monolithisch	sofort	Nein	Druckstrebe	583/2
		IV, 3	600/400/650*0,7	22,4	Nein	Monolithisch	sofort	Nein	Druckstrebe	740/2
		IV a, 1	600/400/650*0,7	21,1	Nein	Monolithisch	sofort	Nein	Druckstrebe	700/2
		IV a, 2	600/400/650*0,7	20,7	Nein	Monolithisch	sofort	Nein	Druckstrebe	670/2
		IV a, 3	600/400/650*0,7	19,8	Nein	Monolithisch	sofort	Nein	Verankerungsbruch	585/2