

Masterarbeit

Stefan Megnet

Einfluss des verfestigenden Verhaltens auf den Biege­widerstand und die Rotationskapazität von geschweissten I-Profil Trägern

Institut für Baustatik und Konstruktion
Stahlbau und Verbundbau
Eidgenössische Technische Hochschule Zürich

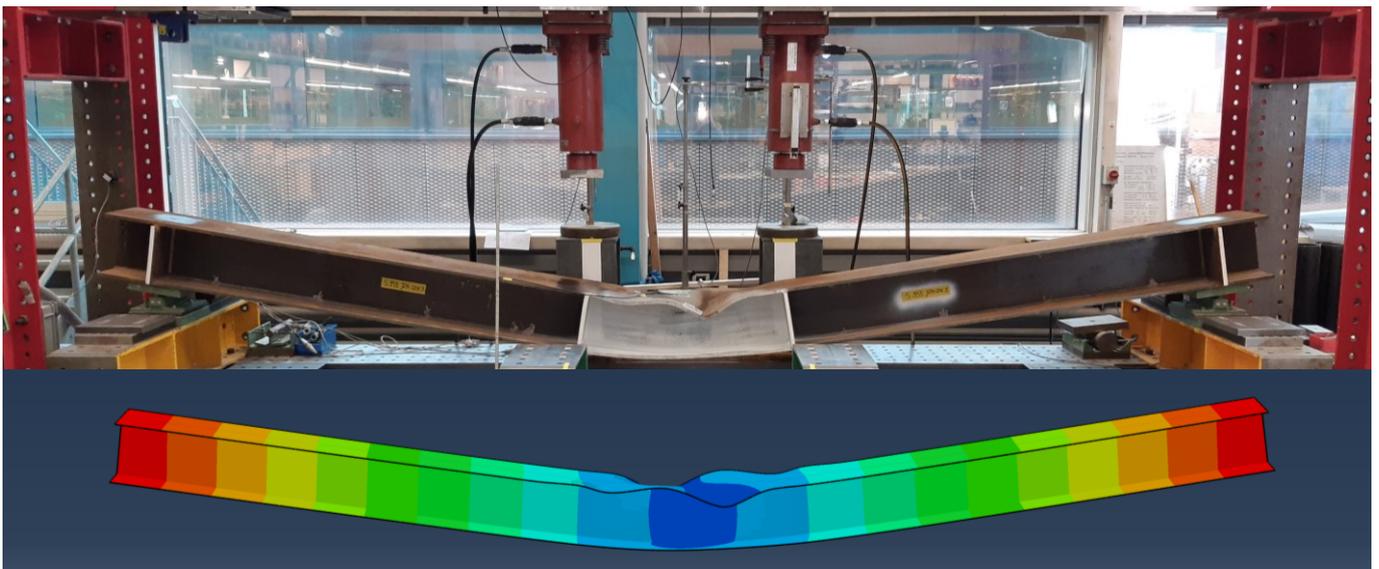
Betreuer:

Prof. Dr. Andreas Taras

Co-Betreuer:

Patrick Studer

Dezember 2021



I. Abstract

Die Forschung hat sich bis anhin primär mit der Untersuchung des Rotationsverhaltens von hochfesten Stahlsorten befasst. Im Rahmen eines neuen Forschungsgebiets wurden in dieser Masterarbeit Untersuchungen zu den maximalen Biege widerständen sowie zum Rotationsverhalten von geschweissten I-Profilen an 4-Punkt Biegeversuchen durchgeführt. Dazu wurden vier unterschiedliche Stahlsorten anhand von jeweils zwei Querschnittsgeometrien geprüft. Drei dieser Stahlsorten repräsentieren handelsübliche, normalfeste Stahlgüten. Hingegen besitzt die Vierte eine gänzlich neue Spannungs-Dehnungsbeziehung mit stark ausgeprägtem verfestigendem Verhalten.

Es wurden Experimente an physischen Trägern durchgeführt und mit Hilfe deren Ergebnisse ein Finite Element Modell kalibriert bzw. validiert. Mit Hilfe dieses FEM-Modells soll es künftig möglich sein, realitätsnahe Prognosen zum Bauteilverhalten abzugeben. In einem weiteren Schritt wurden diese Resultate mit Abschätzformeln aus der Literatur verglichen. Es wird kurz auf die Querschnittsklassifizierung nach Norm eingegangen und eine Parameterstudie dazu durchgeführt.

Da in der Forschung korrekte und exakte Messdaten aus einfachen Messsystemen von fundamentaler Bedeutung sind, wird eine Gegenüberstellung von DMS und DIC Messdaten durchgeführt. Mit dem Ziel zu zeigen, dass die Resultate aus den untersuchten DIC Flächen in Übereinstimmung mit den Messwerten der DMS stehen.

Die genannten Untersuchungen führten zu folgenden Erkenntnissen: 1) Die neue Stahlsorte erreicht massgeblich höhere Rotationskapazitäten und Momentenwiderstände als die handelsüblichen Stahlsorten. 2) Eine realitätsnahe Prognose mit dem FEM-Modell gelingt, wenn die Imperfektionsfigur die Form der ersten Eigenschwingung annimmt. 3) Die Übereinstimmung der Experimentdaten mit der Numerik fällt dabei deutlich besser aus als jene mit der Literatur. 4) Die heutige Querschnittsklassifizierung nach Norm führt zu einer stark konservativen Dimensionierung und somit zu einer ineffizienten Nutzung von Baustahl. 5) Die Gegenüberstellung der DMS und DIC Messdaten zeigte, dass diese beiden Messmethoden dieselben Werte für die Dehnungen ergeben sowie, dass die DIC Messmethode eine einfach, korrekte und flächige Datenauswertung ermöglicht.

II. Danksagung

Ein grosses Dankschön geht an Herrn Prof. Dr. Andreas Taras und die Assistenz des IBK, insbesondere an Herrn Patrick Studer, welche mit konstruktiver Kritik und kompetenter Betreuung zum Gelingen dieser Masterarbeit massgeblich beigetragen haben. Die spannenden Diskussionen auf Augenhöhe, sowie die positiven Rückmeldungen haben meine Motivation während der gesamten Arbeit stetig gesteigert.

Die fünf Wochen der physischen Experimente in der Bauhalle stellten dabei die Krönung meines Studiums an der ETH dar. Die Überprüfung von Theorien und Modellen an realen Trägern in enger Zusammenarbeit mit Herrn Studer war für mich eine der interessantesten und lehrreichsten Phasen meines Bauingenieurstudiums. Sämtliche Schwierigkeiten und Hürden, welche während dieser Zeit angetroffen wurden, konnten in konstruktiven Gesprächen diskutiert und dadurch gemeinsam Lösungen gefunden werden. Dabei führte die Mitberücksichtigung meiner Vorschläge und Ideen zu einer massiven Motivationssteigerung meinerseits.

An dieser Stelle möchte ich ebenfalls dem gesamten Bauhalle Team des IBK danken. Besonders Herr Pius Herzog unterstütze uns tatkräftig bei der Installation und Handhabung der Versuchssteuerung bzw. der Messtechnik. Ohne seine kompetente Hilfe und zielorientierte, pragmatische Art wäre die erfolgreiche Durchführung der Experimente nicht möglich gewesen.

III. Inhalt

I.	Abstract	i
II.	Danksagung	ii
III.	Inhalt.....	iii
IV.	Tabellenverzeichnis	v
V.	Figurenverzeichnis.....	vi
VI.	Abkürzungsverzeichnis	ix
1	Einleitung.....	10
2	Grundlagen & Literatur	12
2.1	Statische und mechanische Grundlagen	12
2.2	Verwendete Norm.....	15
2.3	Bartsch et al. (2021)	15
2.4	Gioncu, V., & Petcu, D. (1997)	17
2.5	Liew, A., & Gardner, L. (2015)	17
3	Material & Methode.....	19
3.1	Physische Experimente.....	19
3.1.1	Stahlträger	19
3.1.2	Prüfaufbau	22
3.1.3	Messtechnik.....	23
3.1.4	Ablauf der physischen Versuche	25
3.2	Numerische Berechnungen	26
4	Resultate.....	28
4.1	Physische Experimente.....	28
4.1.1	3D Scanning des Mittelfeldes	28
4.1.2	Verformungsverhalten der Träger.....	29
4.1.3	Momenten-Rotationsverhalten.....	31
4.1.4	Messwerte aus DMS Messungen	34
4.1.5	Messwerte aus DIC.....	36
4.2	Numerische Berechnungen	43
4.2.1	Untersuchung der Input-Parameter Imperfektionsform und Amplitude	43
4.2.2	Validierung der numerischen Berechnungen an den Experimentdaten.....	44
4.3	Literatur	48
5	Diskussion.....	50
5.1	3D Scanning des Mittelfeldes	50
5.2	Momenten-Rotationsverhalten	51
5.3	Vergleich der Dehnungen aus DMS und DIC	55

5.4	Untersuchung der Querschnittsklassifizierung	58
6	Schlussfolgerung.....	63
7	Ausblick.....	65
8	Literaturverzeichnis.....	66
9	Anhang.....	67
9.1	Anhangsverzeichnis	67

IV. Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Materialeigenschaften der vier verwendeten Stahlsorten	19
Tabelle 2: Aufstellung der wichtigsten geometrischen und mechanischen Grössen für die beiden verwendeten Profile.....	21
Tabelle 3: Zusammenstellung der wichtigsten Resultate aus den physischen Experimenten.....	32
Tabelle 4: Zusammenstellung der wichtigsten Kennzahlen aus den Finite Element Berechnungen für sämtliche acht Träger	48
Tabelle 5: Zusammenstellung der wichtigsten Kennzahlen aus den Ansätzen der Literatur für sämtliche acht Träger	49
Tabelle 6: Zusammenstellung der wichtigen Kennzahlen und Resultate aus den physischen Experimenten, numerischen Modellen und den Daten aus der Literatur für sämtliche acht Träger...	54
Tabelle 7: Vergleich der zugewiesenen QSK nach Norm und aus dem effektiven Momenten-Rotationsverhalten, sowie der Rückrechnung von neuen Grenzzahlen aufgrund dieser tatsächlichen Verhaltensweisen der virtuellen Träger	62

V. Figurenverzeichnis

Figur 1: Statisches System des verwendeten 4-Punkt Biegeversuches und der Verlauf von Querkraft V , Moment M , Verdrehung ϕ und Durchbiegung w im elastischen Bereich nach der Balkentheorie von Bernoulli	12
Figur 2: Annahme zur theoretischen Verformung des Trägers und die Definition der Rotation θ	13
Figur 3: Illustration von elastischem und plastischem Biege widerstand M_{el} bzw. M_{pl} mit den jeweiligen Annahmen zur Dehnungs- und Spannungsverteilung über die Querschnittshöhe	14
Figur 4: Modellannahme zur Definition der Rotationskapazität für QSK 1 Träger (links) und QSK 3 Träger (rechts)	14
Figur 5: Illustration von angenommenem Momenten-Rotationsverhalten nach SIA und Eurocode Normen, unterschieden nach Querschnittsklassifizierung [6]	16
Figur 6: Abbildung des "Continuous Strength Model" (CSM), welches das Spannungs-Dehnungsverhalten von Stahl mit einer Bi-linearen Vereinfachung approximiert [9]	18
Figur 7: Spannungs-Dehnungsverhalten der vier verwendeten Stahlsorten mit den herkömmlichen drei Stahlsorten in schwarz und dem neuartigen Slimfit-Stahl in blau	20
Figur 8: Querschnitt der zwei im Experiment verwendeten Profilgeometrien.....	21
Figur 9: Ansicht des verwendeten Testträgers mit einer freien Spannweite von 5 m und einer Profilhöhe von 300 mm.....	22
Figur 10: Schematische Darstellung des verwendeten Prüfaufbaus als 4-Punkt Biegeversuch mit Testträger in pink und Kipphalterungen in grün	22
Figur 11: Illustration der verwendeten Messtechnik und deren Anordnung am Beispiel des QSK 1 Trägers.....	23
Figur 12: Finite Element Modell des Trägers in Abaqus [12], wobei oben die Vermaschung mit Elementen und unten die Randbedingungen des Modells dargestellt sind	26
Figur 13: Beispiel der Verformungsfiguren der ersten drei Eigenschwingformen (Mode 1, 2 und 3) des QSK 3 Trägers mit der Position der mittleren Rippen in rot	27
Figur 14: Differenzen in Millimeter von der Ist-Lage zur Soll-Lage des oberen Druckflansches des S355J2N_QSK_3 Trägers.....	28
Figur 15: Ausgangslage der physischen Experimente vor dem Start mit fertigem Aufbau und installierter Messtechnik am Beispiel des S460M_QSK_1 (links) und S355M_SF_QSK_1 (rechts)	29
Figur 16: Erste Anzeichen von lokalen Instabilitäten im Druckflansch am Beispiel des S460M_QSK_1 (links) und S355M_SF_QSK_1 (rechts)	29
Figur 17: Verformungsfigur aus der Draufsicht am Ende des Versuches am Beispiel des S460M_QSK_1 (links) und S355M_SF_QSK_1 (rechts)	30
Figur 18: Erste Anzeichen von lokalen Instabilitäten im Druckflansch am Beispiel des S460M_QSK_3 (links) und S355M_SF_QSK_3 (rechts)	30
Figur 19: Verformungsfigur aus der Draufsicht am Ende des Versuches am Beispiel des S460M_QSK_3 (links) und S355M_SF_QSK_3 (rechts)	31
Figur 20: Beispiel des Momenten-Rotationsverhaltens am Träger S460M_QSK_1 zur Verdeutlichung, wie θ_{pl} und θ_u aus den Experimentdaten hervorgehen.....	32
Figur 21: Gegenüberstellung des Momenten-Rotationsverhaltens der QSK 1 und 3 Profilgeometrie am Beispiel der Stahlsorten S460M (links) und S355M_SF (rechts)	33
Figur 22: Momenten-Rotationsdiagramm mit normalisierten Achsen für den Vergleich zwischen den Stahlsorten für die Träger der QSK 1 (links) und der QSK 3 (rechts).....	33
Figur 23: Schematische Darstellung der Anordnung und der Namensgebung der Dehnungsmessstreifen (DMS) über die Höhe des Trägers	34
Figur 24: Verlauf der Dehnungen der fünf DMS Messpunkte über die zurückgelegte Rotation am Beispiel des S355M_SF_QSK_1	35

Figur 25: Darstellung der fünf DMS Messpunkte über die Profilhöhe bei unterschiedlichen Rotationen während des Versuches am Beispiel des S355M_SF_QSK_1	35
Figur 26: Darstellung der fünf DMS Messpunkte über die Profilhöhe bei unterschiedlichen Rotationen während des Versuches am Beispiel des S355M_SF_QSK_3	36
Figur 27: Schematische Darstellung der geplanten DIC-Messbereiche über die Höhe des Trägers.....	36
Figur 28: Verlauf der Dehnungen der 14 ausgewerteten DIC Messpunkte über die zurückgelegte Rotation am Beispiel des S355M_SF_QSK_1.....	37
Figur 29: Darstellung der 14 DIC Messpunkte über die Profilhöhe bei unterschiedlichen Rotationen während des Versuches am Beispiel des S355M_SF_QSK_1	38
Figur 30: Darstellung der 10 DIC-Messpunkte über die Höhe des Profils bei unterschiedlichen Rotationen während des Versuches am Beispiel des S355M_SF_QSK_3	38
Figur 31: Spannungsverteilung über die Höhe des ausgewerteten DIC-Feldes des QSK 1 Trägers aus S355M_SF-Stahl.....	39
Figur 32: Spannungsverteilung über die Höhe des ausgewerteten DIC-Feldes des QSK 3 Trägers aus S355M-Stahl	40
Figur 33: Vergleich der Verschiebungen der QSK 1 Träger aus der ursprünglichen Stegeebene im Endzustand mit S355J2N (erstes Bild), S460M (zweites Bild), S355M (drittes Bild) und S355M_SF (viertes Bild)	41
Figur 34: Vergleich der Dehnungen in Längsrichtung der QSK 3 Träger zum Zeitpunkt einer Durchbiegung in der Mitte von 200 mm mit S355J2N (erstes Bild), S460M (zweites Bild), S355M (drittes Bild) und S355M_SF (viertes Bild)	42
Figur 35: Momenten-Rotationsverhalten der FEM-Berechnungen der drei untersuchten Modes (M1, M2 und M3) und deren Variation mit Amplituden von (0.4 mm, 0.63 mm und 1 mm) dargestellt für den S355M_QSK_1 Träger.....	43
Figur 36: Momenten-Rotationsverhalten der FEM-Berechnungen der drei untersuchten Modes (M1, M2 und M3) und deren Variation mit Amplituden von (0.4 mm, 0.63 mm und 1 mm) dargestellt für den S355M_SF_QSK_3 Träger	44
Figur 37: Vergleich der Momenten-Rotationsverläufe der drei Imperpektionsformen (M1, M2 und M3) der FEM-Modelle mit dem Verhalten des Experimentträgers S355M_QSK_1	45
Figur 38: Vergleich der Momenten-Rotationsverläufe der drei Imperpektionsformen (M1, M2 und M3) der FEM-Modelle mit dem Verhalten des Experimentträgers S355M_SF_QSK_1	45
Figur 39: Gegenüberstellung der beiden Verformungsfiguren von Experiment (links) und FEM-Modell (rechts) im Mittelfeld des S460M_QSK_1 Trägers bei identischer Durchbiegung von rund 360 mm ..	46
Figur 40: Vergleich der Momenten-Rotationsverläufe der drei Imperpektionsformen (M1, M2 und M3) der FEM-Modelle mit dem Verhalten des Experimentträgers S355M_QSK_3	46
Figur 41: Gegenüberstellung der beiden Verformungsfiguren von Experiment (links) und FEM-Modell (rechts) im Mittelfeld des S355M_QSK_3 Trägers bei einer identischen Durchbiegung von 340 mm.	47
Figur 42: Vergleich der Momenten-Rotationsverläufe der drei Imperpektionsformen (M1, M2 und M3) der FEM-Modelle mit dem Verhalten des Experimentträgers S355M_SF_QSK_3	47
Figur 43: Gegenüberstellung der beiden Verformungsfiguren von Experiment (links) und FEM-Modell (rechts) im Mittelfeld des S355M_SF_QSK_3 Trägers bei gleicher Durchbiegung von rund 390 mm..	48
Figur 44: Vergleich der gescannten Imperpektionen mit dem Verformungsbild der ersten lokal auftretenden Beulhalbwellen am Beispiel des S355J2N_QSK_3 Trägers	50
Figur 45: Gegenüberstellung des Momenten-Rotationsverhaltens aus dem Experiment, dem FEM-Modell und den Kennwerten aus der Literatur des S355M_QSK_1 Trägers	51
Figur 46: Gegenüberstellung des Momenten-Rotationsverhaltens aus dem Experiment, dem FEM-Modell und den Kennwerten aus der Literatur des S355M_SF_QSK_1 Trägers.....	52

Figur 47: Gegenüberstellung des Momenten-Rotationsverhaltens aus dem Experiment, dem FEM-Modell und den Kennwerten aus der Literatur des S355M_QSK_3 Trägers	53
Figur 48: Gegenüberstellung des Momenten-Rotationsverhaltens aus dem Experiment, dem FEM-Modell und den Kennwerten aus der Literatur des S355M_SF_QSK_3 Trägers.....	53
Figur 49: Illustration der Messanordnung für den Vergleich zwischen den drei DMS Dehnungsmesspunkten (DMS 2, 3 und 4) gegenüber den korrespondierenden drei DIC-Dehnungsmesspunkte (DIC 2, 3 und 4)	55
Figur 50: Direkte Gegenüberstellung der sechs Dehnungen aus DMS 2, DMS 3 und DMS 4 gegenüber von DIC 2, DIC 3 und DIC 4 über die zurückgelegte Rotation am S355M_QSK_1 (links) und S355M_SF_QSK_1 (rechts).....	56
Figur 51: Illustrationen der Stegverwölbungstheorie am Beispiel des S355M_SF_QSK_1 dargestellt mit den dazu nötigen Parametern s , v , r und α	57
Figur 52: Vergleich der Dehnungsdifferenzen von DMS 2 und DIC 2 des S355M_SF_QSK_1 aus dem Experiment und den Differenzen, welche aus der Stegverwölbungstheorie zu erwarten sind	58
Figur 53: Schematische Darstellung der Variation der Flanschbreite b von 160 mm bis 510 mm in 50 mm Schritten, wobei die Träger mit 210 mm und 310 mm bereits modelliert und mit physischen Experimenten verifiziert wurden	59
Figur 54: Momenten-Rotationsverhalten bei der Variation der Flanschbreite b von 160 mm bis 510 mm an Trägern aus der herkömmlichen Stahlsorte S355M.....	60
Figur 55: Momenten-Rotationsverhalten bei der Variation der Flanschbreite b von 160 mm bis 510 mm an Trägern aus der neuartigen Stahlsorte S355M_SF.....	61

VI. Abkürzungsverzeichnis

A	Querschnittsfläche des Profils
E	Elastizitätsmodul
E_{sh}	Reduzierte Steigung im Spannungs-Dehnungsdiagramm des CSM-Modells
F	Kraft aus Hydraulikpresse, die auf den Träger wirkt
I	Flächenträgheitsmoment um die starke Achse
L	Spannweite zwischen Auflager (im Experiment 5 m)
M	Wirkendes Moment am Träger
M_{el}	theoretisches elastischen Biegemoment
M_{pl}	theoretisches plastischen Biegemoment
M_{peak}	höchstmöglicher Biege widerstand der vom Träger erbracht werden kann
M_u	Moment beim erneuten Erreichen von M_{el} für QSK 3 und M_{pl} für QSK 1
R_{QSK1}	Rotationskapazität für QSK 1 Träger
R_{QSK3}	Rotationskapazität für QSK 3 Träger
V	Querkraft
W_{el}	Elastisches Widerstandsmoment
W_{pl}	Plastisches Widerstandsmoment
YR	Yield Ration
b	Totale Flanschbreite des Trägerprofils
f_y	Fliessspannung
f_u	Streckgrenze
h	Gesamthöhe des Trägerprofils
r	Einheitlicher Radius des verformten Kreises (Stegverwölbungstheorie)
s	Länge des verformten Kreissegments (Stegverwölbungstheorie)
t	Blehdicken des Trägers, wobei Steg- und Flanschbleche identisch sind
v	Horizontale Verschiebung des Stegs aus der vertikalen Ebene (Stegverwölbungstheorie)
w	Durchbiegung
x	Laufvariable über die Länge des Trägers
y	Achse in Profileben mit starkem Momentenwiderstand
z	Achse in Profileben mit schwachem Momentenwiderstand
α	Winkel des Kreissegments durch die Rippenbegrenzungen (Stegverwölbungstheorie)
γ_{M1}	Partieller Sicherheitsfaktor
ε	Abminderungsfaktor für Querschnittsklassifizierung bei höheren Stahlgüten als S235
ε_y	Dehnung bei Erreichen der Fliessgrenze
ε_u	Dehnung bei Erreichen der Streckgrenze
ε_f	Dehnung beim Versagen des Stahls
ε_{CSM}	Dehnung im Bi-linearen Bereich des CSM-Modells
$\varepsilon_{zusätzlich}$	Zusätzliche Dehnungen (Stegverwölbungsmodell)
φ	Verdrehung nach Balkentheorie (in anderen Quellen als Rotationswinkel θ verwendet)
θ	Rotationswinkel auf Bauteilebene
θ_{el}	Rotationswinkel des QSK 3 Trägers bei Erreichen von M_{el}
θ_{pl}	Rotationswinkel des QSK 1 Trägers bei Erreichen von M_{pl}
θ_u	Rotationswinkel beim erneuten Abfallen unter den Biege widerstand M_u

1 Einleitung

Stahl ist in der Baubranche ein wichtiger Baustoff, denn er bringt viele Vorteile mit sich. So kann Stahl grossen Belastungen standhalten, da er hohe Festigkeiten sowohl im Zug- als auch im Druckbereich aufweist. Bei aussergewöhnlichen Lasten kann es je nach Bemessung dennoch zu einer Belastung des Materials über den elastischen Bereich hinauskommen. In dieser Situation hebt sich Stahl dadurch positiv von anderen Baumaterialien ab, dass es sich duktil verhält und im Vergleich zu Beton bei Normalbedingungen kein sprödes Versagen zeigt. Insofern eignet sich Stahl sehr gut für die Konstruktion von stark beanspruchten Teilen der Tragstruktur, welche gleichzeitig die Stabilität gewährleisten und somit auch ein hohes Mass an Verformung mitmachen müssen. Ein Beispiel dazu ist der horizontale Lastabtrag im aussergewöhnlichen Belastungsfall eines Erdbebenereignisses. Neben den mechanischen Vorteilen von Stahl kommt hinzu, dass Stahl rezyklierbar ist und somit bei einer effizienten Wiedergewinnung in eine vollständige Kreislaufwirtschaft integriert werden kann.

Bei Stahl handelt es sich um ein Gefüge aus Metallatomen, welche in einer Gitterstruktur angeordnet sind. Durch die gezielte Veränderung dieses Metallgitters bzw. deren Lücken können neue veränderte Eigenschaften im Materialverhalten erzeugt werden. Nebst den Innovationen auf der metallurgischen Ebene können auch die Behandlungsverfahren beim Abkühlen des Stahls zu einer Verbesserung des Materialverhaltens führen. Dadurch ist es auch heute noch möglich, neue Stahlprodukte zu entwickeln, welche verbesserte Eigenschaften aufweisen und womit neue Anwendungsgebiete in der Bauindustrie erschlossen werden können.

So gab es in den letzten Jahrzehnten grosse Fortschritte in der Herstellung von Stahlsorten mit sehr hohen Fließgrenzen. Diese hochfesten Stahlsorten umfassen üblicherweise jene Güteklassen mit höheren Festigkeiten als 460 MPa, wobei schon heute Stahlsorten mit bis zu 960 MPa Fließgrenze hergestellt werden können. Die Zugwinne dieser Hochleistungsstahlsorten können aber den Nachteil haben, dass die Fließ- und Streckgrenzen sehr nahe beieinander liegen. Zudem tritt das Phänomen auf, dass die ertragbare Verformung im plastischen Bereich nicht mehr so gross ist, wie bei den herkömmlichen Stahlsorten mit tieferer Güte. Diese Nachteile auszumerzen ist nach wie vor Gegenstand von diversen Forschungsarbeiten weltweit.

Eine der ersten Untersuchungen zum Verhalten von Stahlsorten mit Fließgrenzen bis 690 MPa wurden von Haaijer (1961) [1] in den USA publiziert, in welcher der bestmögliche Einsatz dieser hochfesten Stahlsorten in verschiedenen Tragsystemen untersucht wurde. Im Jahr 1969 veröffentlichte McDermott [2], ebenfalls aus den USA, seine Untersuchungen zum Rotationsverhalten von Trägern mit Fließgrenzen von 690 MPa, wobei in diesen Experimenten die Rotationskapazität analysiert wurde. In den folgenden Jahrzehnten kam es zu weiteren Publikationen an hochfesten Stahlsorten, wobei mit dem Aufkommen von numerischen Berechnungsmethoden Vergleiche zu den Experimenten möglich wurden.

In den Arbeiten von H. S. Joo et al. [3] aus Seoul, publiziert im Jahr 2013, wurden nebst der Rotationskapazität und dem Stabilitätsverhalten der Träger weitere Subthemen untersucht. So wurde beispielsweise der Einfluss von eingeschweissten Rippen auf das Bauteilverhalten genauer angeschaut. Mit dem Ergebnis, dass bei hochfesten Stahlsorten mit 800 MPa Fließgrenze teils ein sprödes Versagen im Zugflansch auftrat. Das Versagen trat dabei an derjenigen Stelle auf, wo die Rippen eingeschweisst worden waren.

Des Weiteren untersuchten Schillo & Feldmann (2017) [4] das Rotationsverhalten von geschweissten Stahlträgern, dabei wiesen die Bleche Fließgrenzen von 500, 700 oder 960 MPa auf. Die Profilgeometrien wurden teils leicht variiert und die Tests in einem 3-Punkt Biegeversuch

durchgeführt. Eine wichtige Erkenntnis aus diesen Versuchen war, dass Träger aus hochfesten Stahlsorten in der Tat kleinere Rotationskapazitäten erreichten als diejenigen aus normalfesten Stahlgüten. Hier ist anzumerken, dass diese untersuchten, hochfesten Stahlsorten ein Verhältnis von Streckgrenze zu Fließspannung von lediglich 1.02 bis 1.05 hatten, was einen sehr tiefen Wert darstellt.

Es ist somit eine breite Datengrundlage für das Rotationsverhalten von Trägern aus hochfesten Stahlgüten vorhanden, welche jedoch teilweise nicht die duktilen Verformungen mitmachen, die im konkreten Belastungsfall nötig werden. Ein Grund dafür ist, dass diese Stahlsorten nur ein sehr geringes verfestigendes Verhalten nach Überschreiten der Fließgrenze aufweisen. Sprich, das Verhältnis von Streckgrenze f_u und Fließspannung f_y , nach Formel 1, ebenfalls bekannt als «Yield Ratio (YR)», ist nahe bei eins.

$$YR = \frac{f_u}{f_y} \quad (1)$$

Neuste Durchbrüche in der Stahlfertigung ermöglichten es, eine neue Stahlsorte herzustellen, welche ein gänzlich neues Spannungs-Dehnungsverhalten zeigt. Unter anderem gibt es bei dieser kein Fließplateau mehr und der YR-Wert kann deutlich grösser werden als bei den üblichen Baustahlsorten. Da zu dieser Stahlsorte noch keine genaueren Untersuchungen zum Rotationsverhalten vorhanden sind, soll diese Forschungslücke mit der vorliegenden Arbeit geschlossen werden.

Das Hauptaugenmerk liegt dabei auf der Analyse des Verformungsverhaltens von geschweissten Blechträgern aus unterschiedlichen Stahlsorten. Es werden ganze Stahlträger in 4-Punkt Biegeversuchen untersucht, um das Momenten-Rotationsverhalten auf Bauteilebene besser zu verstehen. Zudem soll untersucht werden, ob Träger mit stark ausgeprägtem verfestigendem Verhalten ein anderes Verhalten zeigen als jene aus den heute gängigen Stahlsorten. Um mögliche neue Anwendungsbereiche in der Baupraxis zu erschliessen, soll des weiteren untersucht werden, ob die Querschnittsklassifizierung nach Norm auch für die neue Stahlsorte zutreffend ist. Damit soll dem Aspekt einer effizienten, ökonomischen und nachhaltigen Anwendung Rechnung getragen werden.

Der Umfang der Arbeit umfasst dabei die physische Prüfung von acht Stahlträgern in 4-Punkt Biegeversuchen, um das reale Momenten-Rotationsverhalten und damit auch die Rotationskapazität zu ermitteln. Dazu soll die Modellierung der Träger mit Imperfektionen in Form der Eigenschwingungen erfolgen. Es soll untersucht werden, welche Parameter dieser Imperfektionsformen dabei den grössten Einfluss auf das Momenten-Rotationsverhalten im FEM-Modell haben. Die Experimente werden durch numerische Finite Element Berechnungen ergänzt. Ziel ist, die Modellierung so zu kalibrieren, dass in Zukunft Prognosen für das Bauteilverhalten möglich sind, ohne teure physische Versuche durchführen zu müssen.

Ein weiterer Aspekt dieser Arbeit ist der Vergleich der Messwerte aus den Experimenten und den FEM-Modellen mit Daten aus der Literatur. Dies, um zu eruieren, ob mit einfachen Formeln schnelle Abschätzungen zum maximalen Biegegewiderstand und zur Rotationkapazität eines Stahlträgers gemacht werden können. Ausserdem soll die Untersuchung zweier Dehnungsmessmethoden zeigen, ob die beiden gemessenen Dehnungen an derselben Stelle des Trägers identische Messwerte ergeben.

Die Arbeit wird sich in Kapitel 2 mit den Grundlagen und der direkt verwendeten Literatur befassen. In Kapitel 3 werden die verwendeten Materialien, Messtechniken und Experimentabläufe vorgestellt. In Kapitel 4 – Resultate – werden die verschiedenen Messdaten und Modellergebnisse präsentiert, welche in Kapitel 5 diskutiert und interpretiert werden. Den Abschluss bilden die Schlussfolgerung sowie der Ausblick auf weiterführende Untersuchungen auf diesem Gebiet.

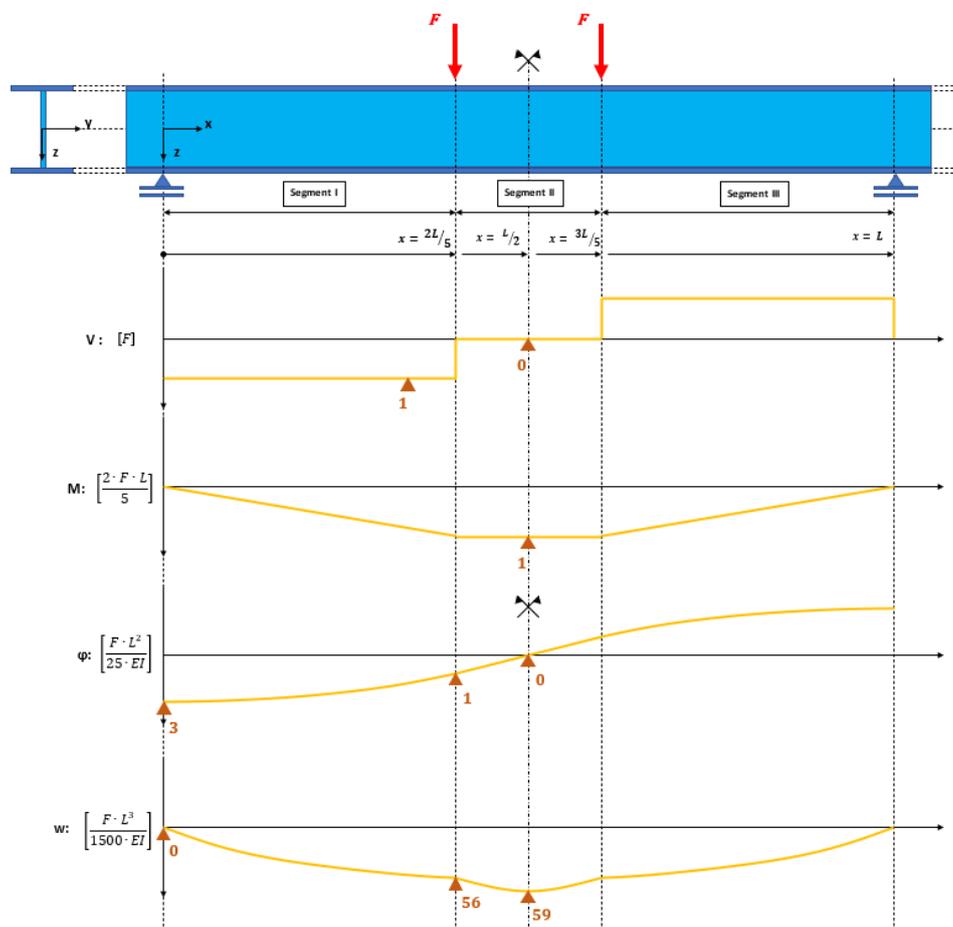
2 Grundlagen & Literatur

2.1 Statische und mechanische Grundlagen

In diesem Unterkapitel sollen - unter Bezugnahme auf die mechanischen Grundlagen - die statischen Systeme vorgestellt werden, die im Rahmen dieser Arbeit untersucht werden. Zudem werden die gängigen Annahmen zu den dehnungs- und spannungstechnischen Abläufen in den Trägern erläutert bzw. dargelegt.

Das gewählte System für die physischen Experimente ist der sogenannte 4-Punkt Biegeversuch. Dieses statische System zeichnet sich durch die beiden verschieblichen Auflager an den Seiten und den zwei Krafteinleitungspunkten im mittleren Bereich des Versuchsträgers aus, dargestellt in Figur 1. Die Spannweite zwischen den Auflagerpunkten entspricht der Länge L und die Randfelder haben je die Abmessungen von $2/5$ dieser Länge L . Es wird angenommen, dass sich der Träger nach der Balkentheorie von Bernoulli verhält und dass die Biegung dominant ist. Die wirkenden Schnittkräfte sind die Querkraft V und das Moment M . Dabei ist die Querkraft nur in den beiden Randfeldern zu erwarten; im Mittelfeld gibt es eine reine Momentenbeanspruchung. Deren Verlauf über den Träger wird im elastischen und plastischen Belastungsbereich wie in Figur 1 angenommen. Die Verdrehung φ und die Durchbiegung w dagegen können mit dieser Theorie nur im elastischen Bereich des Experiments abgeschätzt werden.

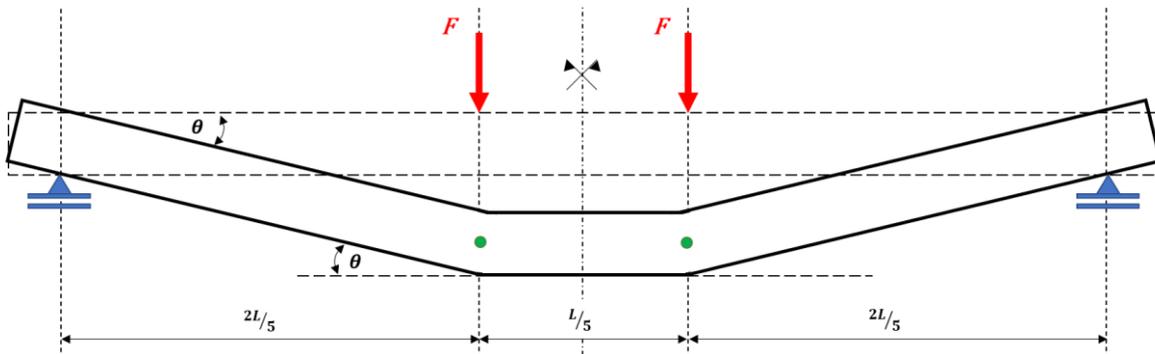
Dabei ist eine grundlegende Annahme der Bernoulli Balkentheorie, dass die Dehnungsfläche im elastischen Spannungsbereich eben bzw. linear bleiben. Diese Modellannahme soll anhand der verwendeten Messtechniken im Experiment untersucht werden.



Figur 1: Statisches System des verwendeten 4-Punkt Biegeversuches und der Verlauf von Querkraft V , Moment M , Verdrehung φ und Durchbiegung w im elastischen Bereich nach der Balkentheorie von Bernoulli

Die Werte und Zahlen in Figur 1 wurden mittels der vierfachen Integration der Belastung und der Lösung dieser Differentialgleichung mit den gegebenen Randbedingungen berechnet. Sämtliche Formeln für den Verlauf der jeweiligen Werte über die Längsachse des Trägers sind in Anhang A detailliert aufgeführt. Beim gewählten Koordinatensystem läuft die Variable x über die Längsachse des Trägers und startet über dem linken Auflager. Die Variable y verläuft im Profilquerschnitt horizontal und verkörpert die starke Achse, wo hingegen die Variabel z nach unten zeigt und die schwache Achse des Profils darstellt.

Figur 2 zeigt die angenommene idealisierte Verformungsfigur im Versuchsaufbau. In der Theorie wird angenommen, dass sich die Plastifizierung und der Grossteil der Verformung auf die Trägerquerschnitte direkt unter den Kräfteinleitungspunkten beschränken. Dies soll mit den beiden grünen Punkten angedeutet werden. Unter dieser Annahme ergibt sich, dass die anderen Segmente zwischen diesen Punkten gerade bleiben und dass sich der Träger symmetrisch nach unten verformt. Anhand dieses Modells kann dann der Rotationswinkel θ des Trägers auf Bauteileben definiert werden, welcher sich beim Wirken der jeweiligen Kraft F am System einstellt. Das Moment, welches vom Träger aufgenommen werden kann, ermittelt sich wiederum aus der jeweils wirkenden Kraft F und dem Abstand zum Auflager, dies ist Figur 1 gegeben.



Figur 2: Annahme zur theoretischen Verformung des Trägers und die Definition der Rotation θ

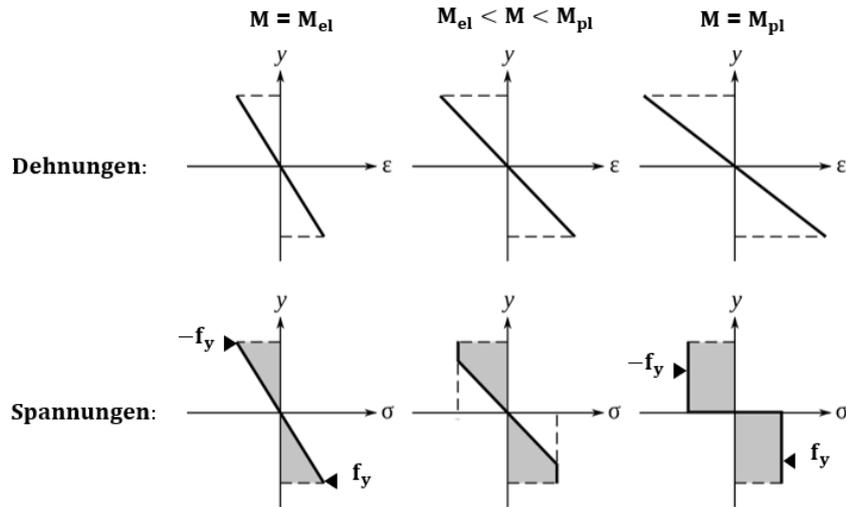
In Realität wird die Verformungsfigur aus Figur 2 jedoch nicht exakt eintreten, denn der plastische Bereich wird sich über das gesamte Mittelfeld mit Länge $L/5$ erstrecken. Dies wird zu einer Krümmung des mittleren Teilbereichs des Trägers führen, welche von lokalen Beulerscheinungen begleitet sein könnte. Somit wird der Winkel θ in der Mitte des Trägers nicht ganz genau dem Winkel θ über dem Auflager entsprechen. Aus diesem Grund wird der Rotationswinkel über den beiden seitlichen Auflagern gemessen.

Die Ermittlung der Biege widerstände werden nach der SIA 263:2013 [5] geführt, wobei im Rahmen von Experimenten kein partielle Sicherheitsbeiwert γ_{M1} berücksichtigt wird. Dies ist gleichbedeutend, dass dieser den Wert 1 annimmt. Zudem wird die Querschnittsklassifizierung (QSK) nach dem üblichen Verfahren der zuvor erwähnten SIA Norm geführt, welche sich über die Längen zu Blechdickenverhältnissen der einzelnen Profilsegmente ergeben.

Wie in Formel 2 und in Figur 3 dargestellt ist, wird der Momentenwiderstand von Stahlträgern der QSK 1 und QSK 2 mit dem plastischen Widerstandsmoment W_{pl} berechnet. Hingegen wird, wie in Formel 3 zu sehen, das Widerstandsmoment von QSK 3 Trägern mit dem elastischen Widerstandsmoment W_{el} ermittelt. Dabei wird in der Theorie angenommen, dass beim Erreichen des elastischen Biegemomentes M_{el} die erste äusserste Randfaser die Fließgrenze überschreitet und es einen linearen Verlauf der Spannung über den Profilquerschnitt gibt. Wie in Figur 3 zu sehen ist, wird beim plastischen Widerstandsmoment M_{pl} angenommen, dass sämtlicher Fasern über den Querschnitt entweder auf Zug oder Druck fließen. In Figur 3 ist ausserdem illustriert, dass die Dehnungsflächen in der Theorie im elastischen und plastischen Belastungsbereich linear verlaufen.

$$M_{Rd,QSK\ 1 \ \& \ QSK\ 2} = \frac{M_{pl}}{\gamma_{M1}} = \frac{W_{pl} \cdot f_y}{\gamma_{M1}} \tag{2}$$

$$M_{Rd,QSK\ 3} = \frac{M_{el}}{\gamma_{M1}} = \frac{W_{el} \cdot f_y}{\gamma_{M1}} \tag{3}$$

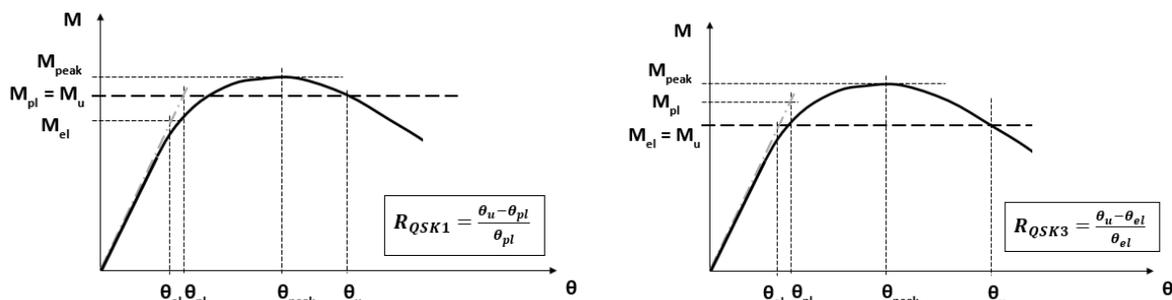


Figur 3: Illustration von elastischem und plastischem Biege­widerstand M_{el} bzw. M_{pl} mit den jeweiligen Annahmen zur Dehnungs- und Spannungsverteilung über die Querschnittshöhe

Die Rotationskapazität des Trägers wird anhand der folgenden beiden Formeln 4 und 5 definiert und ist in Kombination mit Figur 4 zu interpretieren. Der erste Punkt für die Berechnung der Rotationskapazität stellt der theoretische Schnittpunkt zwischen der initialen Steigung im Momenten-Rotationsdiagramm mit dem jeweils angesetzten Biegemoment dar. Dieser Winkel θ des Trägers wird dann für QSK 1 Träger mit θ_{pl} und für QSK 3 Träger mit θ_{el} bezeichnet. Der zweite Punkt, der für die Berechnung der Rotationskapazität nötig ist, ist derjenige Rotationswinkel θ , bei dem der Biege­widerstand wieder unter den zuvor genannten Biegemomentenwert abfällt. Dies wird als θ_u bezeichnet als Anlehnung an das englische Wort «ultimate». Das höchstmögliche Moment, dass vom Träger aufgenommen werden kann wird mit M_{peak} bezeichnet und wird für die Vergleiche mit den Literaturwerten verwendet. In anderen Literaturquellen wird M_u mit unterschiedlicher Definition verwendet. In dieser Arbeit bezeichnet es das Moment, welches für die Berechnung der Winkel θ jeweils massgebend wird, sprich M_{pl} für QSK 1 bzw. M_{el} für QSK 3.

$$R_{QSK1} = \frac{\theta_u - \theta_{pl}}{\theta_{pl}} \tag{4}$$

$$R_{QSK3} = \frac{\theta_u - \theta_{el}}{\theta_{el}} \tag{5}$$



Figur 4: Modellannahme zur Definition der Rotationskapazität für QSK 1 Träger (links) und QSK 3 Träger (rechts)

Der erste Schnittpunkt kann aus der Balkentheorie hergeleitet werden und ist indirekt in Figur 1 zu erkennen. Denn die Verdrehung des Trägers über dem Auflager im elastischen Beanspruchungsbereich entspricht dem Schnittpunkt, der zuvor beschrieben wurde. Mit dieser Figur oder den Daten aus Anhang A können somit die analytischen Formeln 6 und 7 hergeleitet werden.

Im Gegensatz dazu kann θ_u nicht analytisch bestimmt werden, wodurch entweder auf Experimente, numerische Berechnungen oder (semi-) empirische Formeln aus der Literatur zurückgegriffen werden muss.

$$\theta_{el} = \frac{3 \left(M_{el, QSK3} / 2L/5 \right) L^2}{25 \cdot EI_{QSK3}} \quad (6)$$

$$\theta_{pl} = \frac{3 \left(M_{pl, QSK1} / 2L/5 \right) L^2}{25 \cdot EI_{QSK1}} \quad (7)$$

2.2 Verwendete Norm

Die SIA-Normen werden im Rahmen dieser Arbeit insofern berücksichtigt, als dass sie für die Einstufung der Querschnittsklassen (QSK) herangezogen werden. Die Einteilung erfolgt anhand der SIA 263:2013 [5]. In diesem Verfahren werden die einzelnen Blechsegmente anhand ihrer Schlankheit eingeteilt, welche sich aus freier oder gehaltener Länge durch die Blechdicke errechnet. Dieser geometrische Wert wird anschliessend mit Grenzwerten verglichen. Diese Grenzwerte unterscheiden sich dadurch, ob das Segment an nur einer Seite oder an zwei Seiten durch weitere Bleche gestützt wird und ob es sich um eine Druck-, Biege- oder kombinierte Belastung handelt. Diese Klassifizierung wird für sämtliche Segmente vorgenommen und jenes, welche die ungünstigste Querschnittsklassifizierung erreicht (höchste Klasse) ist für das Profil massgebend.

Im Folgenden ist auf zwei Aspekte dieser Querschnittsklassifizierung hinzuweisen: Die «stützende Wirkung», welche die angrenzenden Bleche auf das untersuchte Segment haben, wird als eine gelenkige Lagerung angenommen. Bei gedrungenen Profilen kann es allerdings zu einer positiven Beeinflussung infolge einer gewissen Einspannwirkung der benachbarten Bleche kommen, welche von der Norm nicht direkt berücksichtigt werden kann. Zudem wird die Güteklasse des Stahls über den Abminderungsfaktor ε berücksichtigt, welcher wie in Formel 8 definiert ist.

$$\varepsilon = \sqrt{\frac{235}{f_y}} \quad (8)$$

Somit werden sämtliche Unterschiede des teils deutlich veränderten Verhaltens von Stahlorten mit höherer Fließgrenze als 235 MPa nur durch den Parameter der Fließspannung berücksichtigt. So zum Beispiel ein vollständiges Fehlen des Fließplateaus, in welchem Mass das verfestigende Verhalten auftritt oder wie nahe die Fließ- und Streckgrenzen zusammen liegen. Ausserdem ist bei der Dimensionierung nur der theoretische Wert der Fließspannung bekannt. Da dieser jedoch teils stark vom effektiven Fließspannungswert abweichen kann, ist eine Berücksichtigung dieses Unterschieds mit Formel 8 nicht möglich.

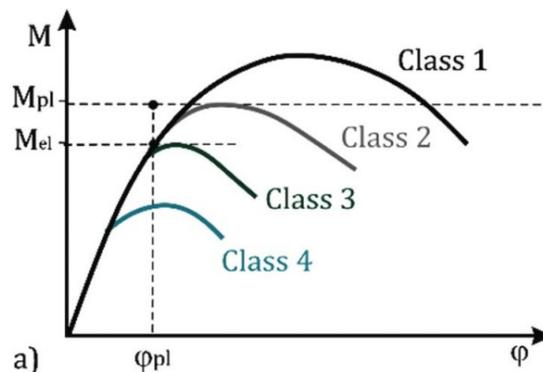
2.3 Bartsch et al. (2021)

In der Publikation von Bartsch et al. [6] wird das Verformungsverhalten von hochfesten Stahlträgern in 3-Punkt Biegeversuchen untersucht. Dabei werden geschweisste Blechträger aus S355 und S690 Stahlgüten und eine hybride Kombination in Experimenten getestet und mit numerischen Modellen überprüft. Hierzu muss allerdings angemerkt werden, dass der Grossteil der Experimente an S690

Trägern durchgeführt wurde und somit der Fokus stark auf den hochfesten Trägern lag. Die Rotationskapazität wird dabei analog wie in Formel 4 berechnet, jedoch wird der griechische Buchstabe φ verwendet. An dieser Stelle sei für sämtliche Quellen darauf hingewiesen, dass in der vorhandenen Literatur für die Winkelbezeichnung alternativ φ oder θ Verwendung findet.

Die Klassifizierung der Querschnittsklassen erfolgt anhand der Eurocode Normen 1993-1-1 [7] wobei diese mit der SIA 263:2013 [5] übereinstimmt. Lediglich für die Bezeichnung der Blechlänge wird in der EN-Norm der Buchstaben «c» anstelle von «b» verwendet. Des Weiteren wird in dieser Quelle darauf hingewiesen, dass für QSK 1 Träger, welche eine grosse Verformungen zulassen müssen und nach dem Verfahren PP gerechnet werden, eine Rotationskapazität von 3 erreichen müssen.

Anhand von Figur 5 aus dieser Quelle kann das unterschiedliche Momenten-Rotationsverhalten von Trägern nach Interpretation der Norm verdeutlicht werden. Die SIA und Eurocode Normen gehen davon aus, dass sich die Momenten-Rotationsverhalten von Trägern mit unterschiedlichen QSK deutlich verschieden verhalten. Dabei zeichnen sich Träger der Querschnittsklasse 1 dadurch aus, dass diese ein M_{peak} erreichen, welches über M_{pl} liegt. Zudem können diese Träger den Biegezugwiderstand auch über grosse Rotationen aufrecht erhalten. Der Momentenwiderstand von QSK 2 Trägern erreicht M_{pl} , sollte jedoch nach dieser Modellannahme nach dem Erreichen schnell wieder abfallen. Ein ähnliches Verhalten sollten QSK 3 Träger zeigen, wobei diese nur Momente bis M_{el} aufnehmen sollten. Bei Querschnittsklasse 4 Trägern kommt es durch lokale Beulerscheinungen zu einem verminderten Biegezugwiderstand, welche dazu führen, dass M_{el} nicht erreicht wird und zudem der Widerstand nach dem jeweiligen Höchststand schnell wieder abnimmt.



Figur 5: Illustration von angenommenem Momenten-Rotationsverhalten nach SIA und Eurocode Normen, unterschieden nach Querschnittsklassifizierung [6]

Im Umfang dieser Quelle werden breit angelegte numerische Modellierungen durchgeführt, welche veränderte Profilgeometrien wie Flansch- und Stegslankheit untersuchen. Einzelne dieser Finite Element Berechnungen werden durch experimentelle Versuche verifiziert, um die Modellierung zu validieren. Anhand der daraus entstandenen Datengrundlage wird eine semi-empirische Formel hergeleitet, welche für die Berechnung von θ_u verwendet werden kann. Diese Abschätzung ist mit Formel 9 wiedergegeben, welche durch die Formel 10 ergänzt wird.

$$\theta_{u,Bartsch \text{ et al. (2021)}} [rad] = \frac{4k_{fy}}{(f_y + \Delta\sigma)bh} \left[\frac{4Eb^3}{5h^2} + \sqrt{(f_yhw)^2 + 4f_ybtwh\Delta\sigma} - f_yhw \right] \quad (9)$$

$$\Delta\sigma = 150MPa \quad \& \quad k_{fy} = \frac{1.1}{\frac{f_y}{400} + 0.25} \quad (10)$$

Dabei beschreiben die Parameter b bzw. h die Gesamtträgerhöhe bzw. Breite sowie w und t die Steg- und Flanschdicken. Der Faktor $\Delta\sigma$ berücksichtigt das verfestigende Verhalten in den lokalen Beulbereichen und k_{fy} jenes aus der Abhängigkeit der Fließgrenze.

Anhand dieser semi-empirischen Formel 9 aus der Literatur und Formel 6 bzw 7 aus der Theorie ist es möglich, einen Wert für die Rotationskapazität ohne Experimente oder FEM-Berechnungen abzuschätzen.

2.4 Gioncu, V., & Petcu, D. (1997)

Diese Publikation von Gioncu & Petcu [8] aus dem Jahr 1997 macht grosse Ausführungen zu Schnittkraftverläufen, plastischen Verformungsfiguren und theoretischen Momenten-Rotationsverhalten von Biegeträgern. Ausserdem werden Formeln zusammengetragen, welche die höchstmöglichen Momentenwiderstände M_{peak} abschätzen sollen.

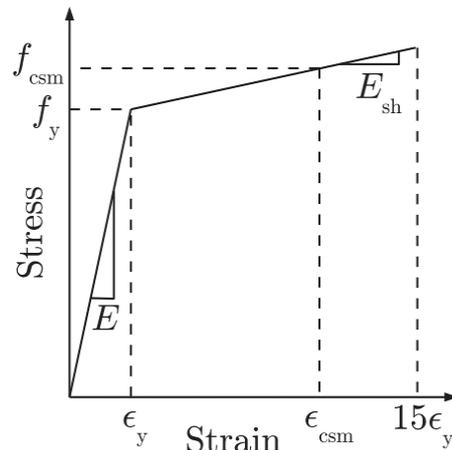
So wird in Formel 11 die Gleichung gezeigt, welche von Sawyer 1961 aufgestellt wurde. Formel 12 zeigt die leicht angepasste Abschätzformel von Lay & Galambos, welche im Jahr 1967 publiziert wurde. Diese beiden Formeln zeichnen sich durch ihre Einfachheit aus, denn es sind lediglich die Geometrie des Profils sowie die Fließ- und Streckgrenze des Stahls erforderlich, um eine Aussage zu treffen. Dies bedeutet aber gleichzeitig, dass andere Parameter wie Fließdehnung oder E-Modul nicht berücksichtigt werden können.

$$M_{peak, Sawyer(1961)} = \frac{1}{4} \left(1 + 3 \frac{f_u}{f_y} \right) M_{pl} \quad (11)$$

$$M_{peak, Lay \& Galambos (1967)} = \frac{1}{2} \left(1 + \frac{f_u}{f_y} \right) M_{pl} \quad (12)$$

2.5 Liew, A., & Gardner, L. (2015)

Eine etwas neuere Quelle aus dem Jahr 2015 von Liew & Gardner [9] führt eine neue Formel ins Feld, welche ebenfalls die Berechnung des maximal möglichen Biege­widerstandes M_{peak} eines Trägers abschätzen soll. Dabei erfolgt die Approximation das Spannungs-Dehnungsverhalten des Stahls mit einer Bi-linearen Vereinfachung. Dies wird als «continuous strength model» (CSM) bezeichnet und ist in Figur 6 veranschaulicht. Dabei werden im elastischen Bereich nach wie vor die Parameter E und f_y verwendet. Beim Erreichen der Fließspannung wird jedoch eine geringere Steigung im Spannungs-Dehnungsverlauf angenommen und mit E_{sh} beschrieben. Die Anwendung dieses CSM-Modells auf die verwendeten Stahlsorten ist in Anhang B wiedergegeben.



(c) CSM material model

Figur 6: Abbildung des "Continuous Strength Model" (CSM), welches das Spannungs-Dehnungsverhalten von Stahl mit einer Bi-linearen Vereinfachung approximiert [9]

Aus diesem Modell leiten die beiden Autoren eine Gleichung zur Abschätzung von M_{peak} eines Trägers mit I-Profil her, welche in Formel 13 gegeben ist. Im Gegensatz zu den Formeln 11 und 12 berücksichtigt diese Gleichung mehr Input-Parameter wie die beiden E-Moduli E und E_{sh} , sowie die Fließdehnung ϵ_y und die Bi-lineare Dehnung ϵ_{csm} . Zu den Parametern der Widerstandsmomente W_{el} und W_{pl} kommt der Faktor α dazu, welcher für I-Profile mit reiner Biegung um die starke Achse den Wert 2 annimmt.

$$M_{peak, Liew \& Gardner (2015)} = \frac{W_{pl} f_y}{\gamma_{M0}} \left[1 + \frac{E_{sh}}{E} \frac{W_{el}}{W_{pl}} \left(\frac{\epsilon_{csm}}{\epsilon_y} - 1 \right) - \left(1 - \frac{W_{el}}{W_{pl}} \right) / \left(\frac{\epsilon_{csm}}{\epsilon_y} \right)^\alpha \right] \quad (13)$$

3 Material & Methode

In Kapitel 3.1 werden die verwendeten Materialien, Messtechniken und Versuchsabläufe geschildert, die bei den physischen Experimenten in der Bauhalle zur Anwendung kamen. Im Kapitel 3.2 werden die Finite Element Modellierungen beschrieben und ausgeführt, was diese virtuellen Modelle auszeichnet. Die Vergleichsmethoden aus der Literatur, welche in Kapitel 2 vorgestellt wurden, werden in diesem Kapitel nicht mehr explizit aufgegriffen. Denn die Modelle und Formeln aus Kapitel 2.3 bis 2.5 werden 1:1 verwendet und die Ergebnisse dann in Kapitel 4.3 aufgeführt.

3.1 Physische Experimente

3.1.1 Stahlträger

Im Rahmen der physischen Experimente in der Bauhalle werden vier Stahlsorten untersucht. Einer der verwendeten Stahlsorten ist der S355J2N, welcher als gängiger Baustahl in der Baubranche sehr weit verbreitet ist. Die Zahl nach dem Buchstaben «S» bezeichnet die theoretische Mindestflussgrenze. Der Zusatz «J2» beschreibt die Kerbschlagarbeit des Stahls und der Zusatz «N» bedeutet, dass es sich um einen «normalisierend gewalzten Feinkornstahl» handelt. Ausserdem werden die Stahlgüten S460M und S355M untersucht, wobei der Zusatz «M» für «thermomechanisch gewalzten Feinkornbaustahl» steht. Diese beiden Stahlsorte sind in der Baupraxis etwas weniger verbreitet als der S355J2N, jedoch stellt deren Anwendung in der Bauindustrie keine Seltenheit dar. Bei diesen drei Stahlsorten handelt es sich um üblicherweise verwendeten Stahlsorten; sie werden im weiteren Verlauf dieses Berichts auch als «herkömmliche» oder «gängige» Stahlsorten bezeichnet.

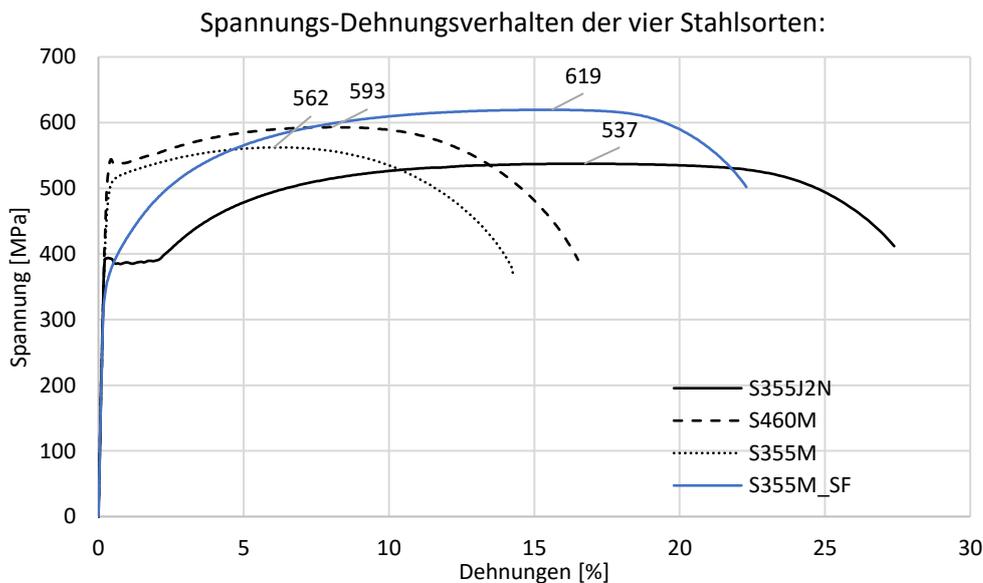
Eine Erneuerung auf dem Feld der Stahlherstellung ist vor kurzem der Firma Voestalpine aus Österreich gelungen. Ihnen ist es geglückt, einen Stahl mit gänzlich neuem Spannungs-Dehnungsverhalten zu kreieren. Diese neue Stahlsorte wird fortan als S355M_SF bezeichnet, wobei die Zahl und der erste Buchstabenzusatz analog wie zuvor ausgeführt zu interpretieren sind. Der zweite Zusatz «SF» ist eine Abkürzung für «Slimfit», denn es wird angenommen, dass mit diesem Stahl eine schlankere Stahlbauweise erreicht werden kann. Somit ist dies eine Anspielung auf das englische Wort «slim» für «schlank».

In Tabelle 1 sind die wichtigsten Materialkennwerte der vier unterschiedlichen Stahlsorten aufgeführt und zusätzlich in Figur 7 illustriert. Es kann festgehalten werden, dass sämtliche Stahlsorten höhere Fließspannungen aufweisen als von der Klassifikation gefordert. Der S355M_SF ist am nächsten beim theoretischen Wert von 355 MPa. Die Stahlsorten S355J2N und S460M liegen dabei schon deutlich über den jeweiligen Mindestwerten. Der S355M hat eine Fließgrenze von 507 MPa und liegt somit weit über dem Zielwert von 355 MPa. Die herkömmlichen Stahlsorten weisen Streckgrenzen bis knapp 600 MPa auf, hingegen übertrifft der S355M_SF all diese Werte mit einer Streckgrenze von 619 MPa. Dies ist der Grund, weshalb der Slimfit-Stahl einen so hohen YR-Wert von 1.67 aufweist. Im Vergleich dazu besitzt der J2N einen YR-Wert von 1.37, was für Stahl bereits hoch ist. Die beiden Stahlsorten S460M und S355M haben dagegen eher kleine YR-Werte von 1.09 bzw. 1.11. Das Elastizitätsmodul ist dabei für alle verwendeten Stahlsorten in einem sehr ähnlichen Bereich.

Tabelle 1: Materialeigenschaften der vier verwendeten Stahlsorten

Material	f_y [MPa]	f_u [MPa]	ϵ_u [%]	ϵ_f [%]	f_u/f_y [-]	E [MPa]
S355J2N	393	537	16.7	28.2	1.37	212'738
S460M	543	593	8	17.2	1.09	211'766
S355M	507	562	6.4	15.3	1.11	211'334
S355M_SF	370	619	15.5	22.6	1.67	204'372

In Figur 7 ist gut zu erkennen, inwiefern sich der neue Slimfit-Stahl von den herkömmlichen drei Stahlsorten unterscheidet. Der S355J2N-Stahl ist der Einzige, der nach dem Überschreiten der Fließspannung ein Fließplateau aufweist. Nach dieser Dehnung von rund 2 % kommt es zu einem verfestigenden Verhalten, wodurch die aufgenommene Spannung von 390 MPa bis auf 537 MPa erhöht werden kann. Im Gegensatz dazu weisen die Stahlsorten S460M und S355M kein Fließplateau auf und das verfestigende Verhalten ist weniger stark ausgeprägt. Zudem sind deren Dehnungen bei der Höchstspannung ϵ_u und die Dehnungen beim Versagen ϵ_f deutlich tiefer als bei den anderen zwei Stahlsorten.

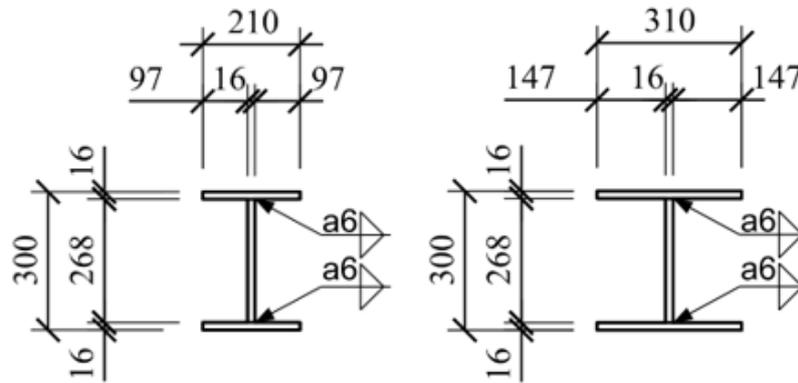


Figur 7: Spannungs-Dehnungsverhalten der vier verwendeten Stahlsorten mit den herkömmlichen drei Stahlsorten in schwarz und dem neuartigen Slimfit-Stahl in blau

Der neue S355M_SF erreicht zwar als erster die Fließgrenze, jedoch weist dieser kein Fließplateau auf, sondern geht direkt in ein verfestigendes Verhalten über. Dadurch wird nach 2 % Dehnung bereits eine Spannung von rund 500 MPa erreicht, wo hingegen beim S355J2N dieser noch bei der Fließspannung verharrt. Die Spannung kann beim Slimfit zudem über sehr grosse Dehnungen noch gesteigert werden. So erreicht dieser seine Streckgrenze bei rund 15 % Dehnung. Im Vergleich dazu wäre der S460M nahe beim Versagen und der S355M hätte schon versagt. In Figur 7 soll deutlich hervorgehoben werden, wie der Slimfit neue Stahleigenschaften schafft und somit auch die Notwendigkeit gegeben ist, dieses Materialverhalten auf Bauteilebene zu untersuchen.

In den Experimenten werden die zwei in Figur 8 dargestellten Profilgeometrien verwendet. Die Versuche werden an geschweissten I-Profilen durchgeführt. Dabei werden für alle Träger dieselben Blechdicken t von 16 mm verwendet. Die Gesamthöhe h des Profils beträgt 300 mm. Die beiden Profilgeometrien unterscheiden sich nur in der totalen Flanschbreite b von 210 mm bzw. 310 mm. Sämtliche Schweissverbindungen werden durch Kehlnähte mit 6 mm Wurzelmass realisiert.

Der Grund für die Wahl dieser beiden zuvor genannten Flanschbreiten ist, dass derjenige mit 210 mm nach SIA 263:2013 [5] einem Profil der QSK 1 entspricht. Das Profil mit einer Flanschbreite von 310 mm wird nach derselben Norm der QSK 3 zugeteilt. Für beide Profilgeometrien wird der einseitig gehaltene Teil des Druckflansches unter reiner Druckbeanspruchung massgebend.



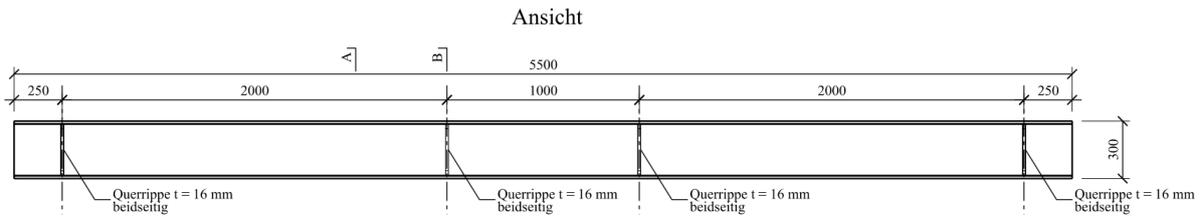
Figur 8: Querschnitt der zwei im Experiment verwendeten Profilgeometrien

In Tabelle 2 werden die wichtigsten geometrischen und mechanischen Grössen zusammengefasst. Zu den Profilabmessungen b , h und t kommen die Querschnittsfläche A und das Flächenträgheitsmoment I , sowie W_{el} und W_{pl} der idealisierten Profile hinzu. So führt die Vergrösserung der Profilfläche um 30 % zu einer Steigerung des Flächenträgheitsmoment um rund 40 %. Werden diese wie in Formel 2 und 3 mit der jeweiligen Fließspannung des Stahls verrechnet, ergeben sich die Biegemomentenwiderstände M_{el} und M_{pl} . Die Werte in Klammern sind so zu interpretieren, dass diese für das jeweilige Profil theoretisch nicht benötigt werden, da die QSK entweder den elastischen oder plastischen Wert ansetzt. Der Vollständigkeit halber werden die Werte trotzdem in Tabelle 2 aufgeführt.

Tabelle 2: Aufstellung der wichtigsten geometrischen und mechanischen Grössen für die beiden verwendeten Profile

	QSK 1 – Träger:				QSK 3 – Träger:			
b [mm]	210				310			
h [mm]	300				300			
t [mm]	16				16			
A [mm²]	11'008				14'208			
I [mm⁴]	161'310'549				225'903'616			
W_{el} [mm³]	(1'075'404)				1'506'024			
W_{pl} [mm³]	1'241'536				(1'695'936)			
Stahlsorte	S355J2N	S460M	S355M	S355M_SF	S355J2N	S460M	S355M	S355M_SF
M_{el} [kNm]	(423)	(584)	(545)	(398)	592	818	764	557
M_{pl} [kNm]	488	674	629	459	(667)	(921)	(860)	(627)

In Figur 9 ist die Ansicht der getesteten Träger dargestellt, wobei die Gesamtlänge 5.5 m und die freie Spannweite L zwischen den Auflagern 5 m beträgt. Die Randfelder nehmen demzufolge eine Länge von 2 m an und das Mittelfeld eine Länge von 1 m. Die Abgrenzung dieser Teilbereiche des Trägers sind durch die eingeschweissten Rippen gut zu erkennen. Die Rippen bestehen aus dem identischem Material wie der jeweilige Träger und wurden ebenfalls mit 6 mm Kehlnähten rundum eingeschweisst. Der Grund für die Verwendung der Rippen ist, dass die lokale Ein- und Ausleitung der Kräfte zu einem Stabilitätsproblem führen kann, was durch die Rippen verhindert wird. Zusätzlich erfüllen die leicht überstehenden Rippen gleichzeitig die Funktion der kontaktschlüssigen Verbindung zwischen dem Träger und den im folgenden Kapitel vorgestellten Kipphalterungen.

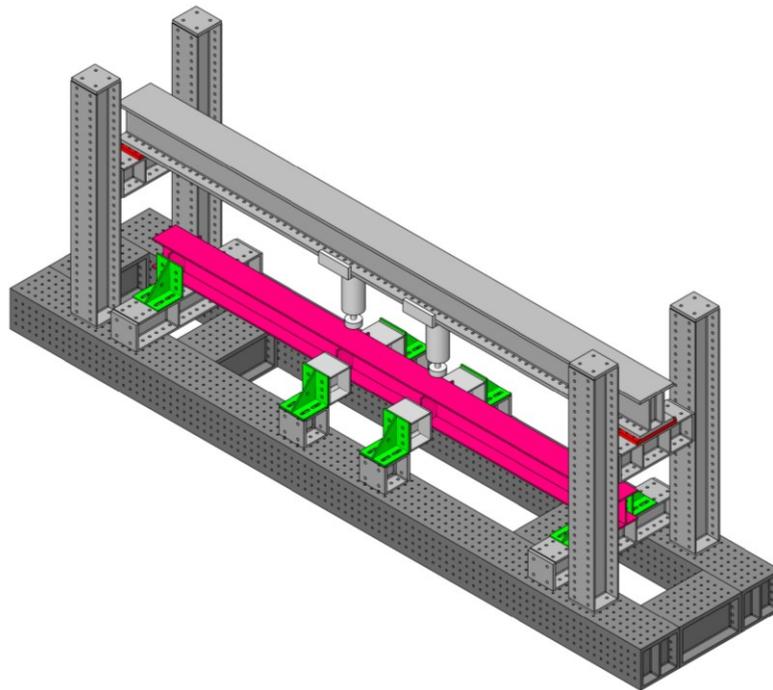


Figur 9: Ansicht des verwendeten Testträgers mit einer freien Spannweite von 5 m und einer Profilhöhe von 300 mm

In der Summe ergibt dies einen Umfang von acht zu testenden Trägern, da vier unterschiedliche Stahlsorten in jeweils zwei Profilgeometrien untersucht werden.

3.1.2 Prüfaufbau

Wie in Kapitel 2 vorgestellt, wird die Untersuchung des Biegeverhaltens der Stahlträger an einem weggesteuerten 4-Punkt Biegeversuchsaufbau durchgeführt. Der schematische Prüfaufbau ist in Figur 10 dargestellt.



Figur 10: Schematische Darstellung des verwendeten Prüfaufbaus als 4-Punkt Biegeversuch mit Testträger in pink und Kipphalterungen in grün

Darin ist der zu untersuchende Träger pink und sämtliche anderen Träger des Prüfrahmens in grau eingefärbt. Die zwei Hydraulikpressen werden am oberen Rahmenträger befestigt und leiten die Kraft vertikal in den zu prüfenden Träger ein. Der pink eingefärbte Versuchsträger liegt an den Enden auf den beiden horizontal verschieblichen Lagern auf, welche eine freie Verdrehung des Trägers um die y-Achse ermöglichen. Um die horizontale Verschiebung zu gewährleisten, werden zwei horizontale Teflon-Lamellen im Auflagersystem verwendet.

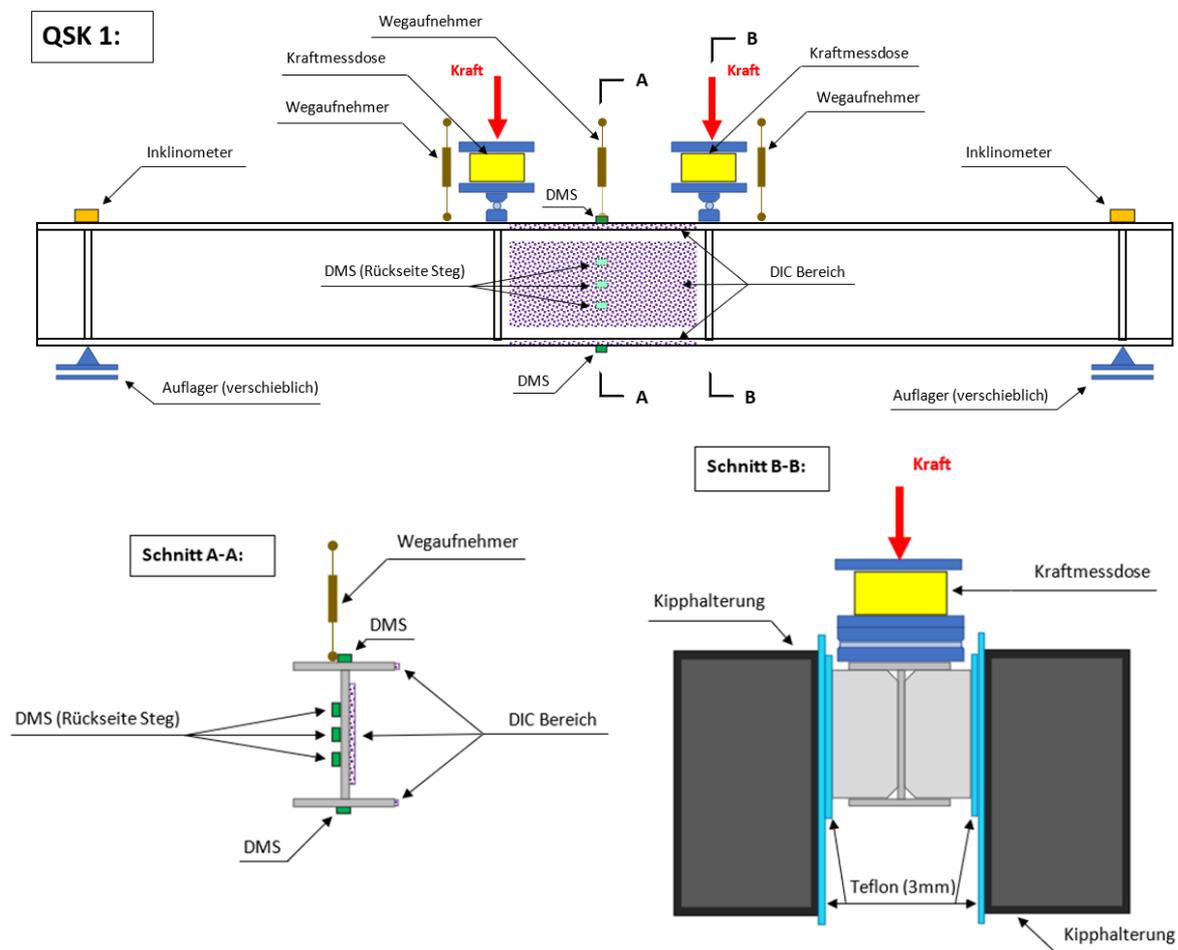
Um zu verhindern, dass sich der Testträger seitlich der Last entzieht, werden an den Krafteinleitungsorten Kipphalterungen verwendet, welche in Figur 10 grün eingefärbt sind. Um die passenden Höhen und Abstände dieser Kipphalterungen zum Mittelfeld des Träger zu erreichen, werden massive Stahlträgerelemente eingesetzt. Diese dienen zugleich als vertikale Führung der überstehenden Rippenenden während des Versuchsdurchlaufs. Um die Reibung bei der zurückgelegten Durchbiegung möglichst klein zu halten, werden wiederum zwei Lagen Teflon mit je 3 mm Dicke verwendet. Dies ist in Schnitt B-B der Figur 11 dargestellt.

Die Einleitung der Kraft beim Mittelfeld erfolgt über Linienlager, welche 270 mm lang und 80 mm breit sind und eine Verdrehung um die y -Achse erlauben. Somit wird gewährleistet, dass auch bei grossen Durchbiegungen, die Kraft vertikal eingeleitet werden kann. In der Ansicht und in Schnitt B-B der Figur 11 sind diese beiden Kipplager unter den Hydraulikpressen blau angedeutet.

Bei den verwendeten Hydraulikpressen handelt es sich um «Double Acting Cylinder», welche über ein Hydraulikaggregat gesteuert werden. Die automatische Regelung über ein Aggregat ermöglicht es, dass beide Hydraulikpressen den gleichen Zylinderdruck erfahren und somit die identische Kraft an beiden Stellen in den Trägers eingeleitet wird. Eine Presse kann dabei bis 700 kN Kraft aufbringen und eine maximale Hublänge von 184 mm zurücklegen.

3.1.3 Messtechnik

Die verwendete Messtechnik wird in Figur 11 aufgezeigt und in den folgenden Abschnitten detailliert erklärt. Dabei zeigt die obere Graphik die Vorderansicht des Trägers auf welche sich die beiden ergänzenden Schnitte beziehen. Die Anordnung der Messtechnik am Träger wird anhand des QSK 1 Trägers gezeigt. Da die Positionierung für die QSK 3 Träger beinahe identisch ist, wird auf eine zweite Illustration verzichtet.



Figur 11: Illustration der verwendeten Messtechnik und deren Anordnung am Beispiel des QSK 1 Trägers

Noch vor dem Bestücken des Trägers mit den im Figur 11 gezeigten Messinstrumenten wird das Mittelstück des Trägers mit einem 3D Handscanner aufgenommen. Dies, um mögliche Imperfektionen zu erfassen und deren Amplitude mit Zahlen genau zu quantifizieren. Verwendet wurde dafür der Go!SCAN 3D 50 der Firma Creaform. Die Auswertung dieser Rohdaten erfolgte dann mit dem Computerprogramm Gom Inspect [10].

Von zentraler Bedeutung für die Beurteilung des Rotationsverhaltens des Trägers auf Bauteilebene ist der Winkel θ bei den Auflagern. Dazu werden Inklinometer vertikal über den Auflagern auf dem Oberflansch des Trägers montiert. In Figur 11 sind diese Inklinometer orange eingefärbt. Die verwendeten Inklinometer des Typs SCA100T-D01-1 haben einen maximalen Messbereich von $\pm 30^\circ$, was für die maximale Verformung des Trägers ausreichend ist.

Zwischen den Hydraulikpressen und den zuvor erwähnten Linienlagern beim Mittelfeld werden die Kraftmessdosen angebracht. Diese sind in Figur 11 gelb dargestellt und werden für eine optimale Kraftübertragung oben und unten durch 30 mm dicke Stahlplatten ergänzt. Die maximale Kraft, die von den Kraftmessdosen aufgenommen werden kann, liegt dabei im Meganewtonbereich. Da eine Hydraulikpresse maximal 700 kN aufbringen kann, ist dies für den Versuch ausreichend. Mit diesen beiden letzteren Messmitteln kann somit das erzeugte Moment am Träger und dessen Rotationsverformung ermittelt werden. Somit ist es möglich das Momenten-Rotationsdiagramm für den jeweiligen Versuch zu erstellen.

Drei Wegaufnehmer werden auf dem Oberflansch des Trägers angebracht, welche in Figur 11 braun dargestellt sind. Derjenige in der Mitte des Trägers (Schnitt A-A) dient zur Steuerung des Versuches über den Weg. Die anderen zwei werden in der Nähe der beiden Hydraulikpressen angebracht und dienen als zusätzliche Redundanzmessung. Die verwendeten Wegaufnehmer sind an einer separaten Vorrichtung befestigt. Somit ist gewährleistet, dass es zu keiner Verfälschung dieser Messwerte durch die Verformung des Trägers kommt. Die verwendeten Wegaufnehmer können dabei bis zu 500 mm Weg mitmachen.

Ausserdem sollen die Dehnungen in Längsrichtung und somit in der x-Achse des Trägers untersucht werden. Die Verwendung von Dehnungsmessstreifen (DMS) ist dazu eine etwas ältere, aber gut etablierte Methode. Je ein DMS wird dabei mittig auf dem Flansch in der Mitte der Träger aufgeklebt (Schnitt A-A). Hinzu kommen drei weitere DMS, welche auf der abgewandten Seite des Stegs angebracht werden. Dabei liegt der mittlere in der Mitte der Profilhöhe und die beiden benachbarten um je 55 mm nach oben und unten versetzt. Die verwendeten Dehnungsmessstreifen des Typs 1-LYx-10/120 sind für die linearen Dehnungen an Stahl zugelassen, haben Abmessungen von 10 auf 25 mm und messen mit einem Widerstand von 120 Ohm. Der Ablauf bei der Montage der DMS umfasste als Erstes die Reinigung der Klebestelle mit Propanol. Anschliessend wurde der DMS mit produktkompatiblem Leim befestigt und die DMS Kontaktstellen mit Verlängerungsdrähten zusammengelötet. Hierzu muss angemerkt werden, dass die Befestigung der DMS sehr zeitaufwendig und fehleranfällig war. So gab es teilweise Probleme mit brechenden Lötstellen sowie fehlerhaften Klebeverbindungen. Aus diesen Gründen wurden lediglich die vier Träger aus S355M und S355M_SF der beiden Querschnittsklassen QSK 1 und 3 damit ausgerüstet.

Eine neuere Form der Messtechnik stellt die «Digital Image Correlation» Technik dar, fortan abgekürzt mit DIC. Dabei werden mit zwei Kameras in regelmässigen Zeitabständen Stereobilder des zu untersuchenden Bereichs des Trägers aufgenommen. Mit dem zuvor aufgebrauchten schwarzen Specklemuster auf weissem Hintergrund können die Verformungen und Verzerrungen digital festgehalten werden. Dies ist ein bildauswertendes Verfahren, welches im Gegensatz zur Punktauswertung mit DMS eine Auswertung über grössere Flächen ermöglicht. Zudem können damit nebst Dehnungen auch Verschiebungen und Verformungsfiguren ermittelt werden. In Figur 11 ist zu sehen, dass der zu untersuchende Bereich der DIC Messungen im Mittelfeld des Trägers liegt. Dabei liegt der Fokus auf der Vorderseite des Stegs, wobei auch versucht wird, die Ansichten der beiden Flansche auszuwerten. Bei den verwendeten DIC Komponenten handelt es sich um zwei FLIR 12.3 MP Kameras mit 24 mm Linsen und einer Sensorgrösse von 14.13 x 10.35. Um eine optimale Ausleuchtung des Mittelfeldbereiches zu erreichen, wurden zwei HEDLER LED Spotlights eingesetzt sowie ein

Specklemuster mit einer Tüpfengrösse von 1.27 mm. Die beiden Stereokameras sind vertikal übereinander mit einem Abstand von 1.8 m angeordnet, welche einen horizontalen Abstand von 2.5 m zum Steg des Trägers haben. Die Auswertung der DIC Daten erfolgte mit der Software Vic-3D [11].

In Schnitt A-A der Figur 11 ist gut zu erkennen, dass die DMS auf der Rückseite des Stegs und die DIC Fläche auf der Vorderseite des Stegs theoretisch die gleichen Dehnungen messen sollten. Somit kann ein Vergleich dieser beiden Messmethoden erreicht werden. Zusätzlich ist in Schnitt B-B die vertikale Kipphalterung mit den je zweilagigen Teflon-Lamellen dargestellt, welche die überstehenden Rippen des Trägers halten.

3.1.4 Ablauf der physischen Versuche

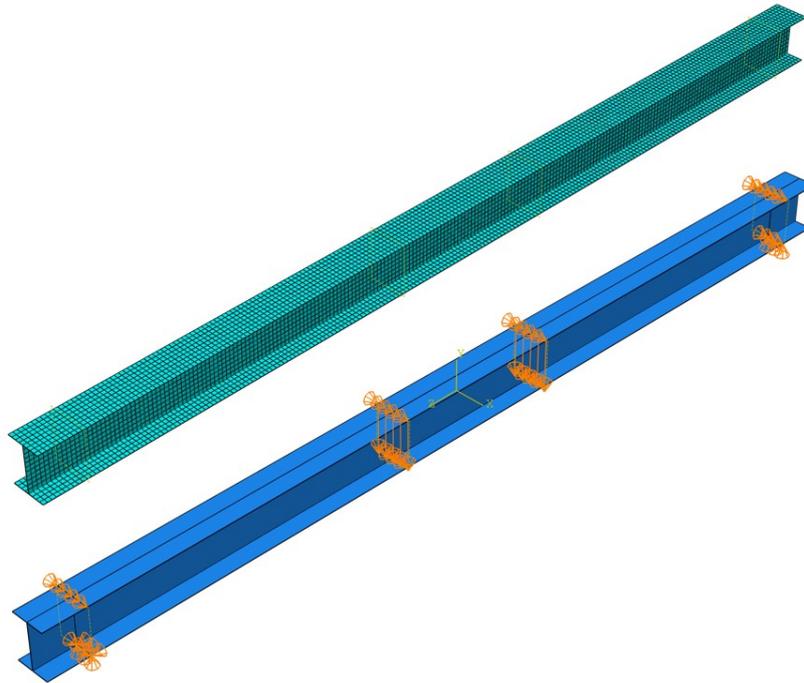
Die Vorbereitung der Träger umfasste das 3D Scanning im Mittelfeld, das Kleben und Verkabeln der DMS und das Spritzen der weissen Hintergrundfarbe für das anschliessende Aufbringen des Punktmusters im DIC Bereich. Nach dem Einbau des Trägers in den Prüfaufbau wurden die restliche Messmittel wie Inklinometer und Wegaufnehmer mit Magneten angebracht. Zudem wurden die Kipphalterungen mit den vertikalen Teflon-Lamellen eingebaut und gut festgezogen, um ein horizontales Ausweichen des Trägers zu verhindern. Anschliessend wurde das DIC vor dem Träger aufgebaut und die Kalibrierung beim Steg des Trägers vorgenommen.

Der Versuch wurde weggesteuert gefahren, um das abfallende Verhalten der Momenten-Rotationsbeziehung zu erfassen. Die Wegsteuerung erfolgte dabei über den Wegaufnehmer in der Mitte des Trägers. Dabei wurde eine Belastungsgeschwindigkeit von 10 mm/Minute gewählt. Der Träger wurde beim Start des Versuchs zuerst mit je 25 kN belastet, um den Luftspalt zwischen den Hydraulikpressen zu schliessen. Anschliessend wurden sämtliche Messinstrumente genullt und die Belastung gestartet, bis die Hydraulikpressen den maximalen Weg erreichten.

Da die Hublänge der Hydraulikpressen jedoch nicht für die gesamte angestrebte Verformung ausreichend war, wurden Shiftelemente bei den Entlastungszyklen eingebracht. Dabei handelte es sich um ROR 177.8/25 Profile aus S355 in unterschiedlichen Längen. Je nach freiwerdendem Platz des zurückgefahrenen Hydraulikzylinders konnten die passenden ROR-Längen verwendet werden. Die Anzahl der Shiftungen war unterschiedlich für die einzelnen Träger, variierte aber zwischen einer bis drei Belastungszyklen. Der Versuch wurde nach Möglichkeit so weit gefahren, bis der Momentenwiderstand wieder unter den Wert M_u abfiel und somit θ_u im Experiment bestimmt werden konnte.

3.2 Numerische Berechnungen

Zur numerischen Modellierung mit einem Finite Element Programm wird die gängige Software Abaqus der Firma Dassault Systèmes Simulia Corp. [12] verwendet. In Figur 12 ist das Modell des QSK 1 Trägers gezeigt und dient als Illustration zum nachfolgend beschriebenen Modellierungsvorgehen.



Figur 12: Finite Element Modell des Trägers in Abaqus [12], wobei oben die Vermaschung mit Elementen und unten die Randbedingungen des Modells dargestellt sind

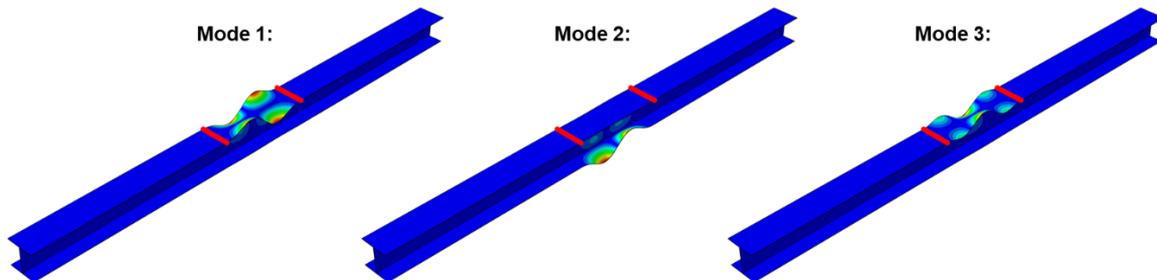
Die Modellierung erfolgt mit S4R-Schalenelementen, wobei ein Element eine Grösse von rund 25 mm aufweist. Dies ergibt für die QSK 1 Träger knapp 6000 und für die QSK 3 Träger rund 7700 Elemente. Da die Querschnittsfläche des Trägers im FEM-Modell durch Schalen und somit Linien vereinfacht wird, erfolgt die Definierung des Querschnittsprofils anhand der Schwerelinien der Bleche. So entspricht die Höhe des Profils im Modell der Gesamthöhe abzüglich einer Blechdicke, was im Ergebnis 284 mm ergibt.

Die eingeschweissten Rippen im Experiment werden im FEM-Modell mit «Coupling» Beziehungen modelliert. Dabei werden die jeweiligen Querschnittspunkte in den Rippenquerschnitten als zueinander starr angenommen, womit die Realität in einem angemessenen Rahmen abgebildet werden kann.

Der untere Träger in Figur 12 zeigt die angesetzten Randbedingungen im Modell. Nebst den gelenkigen seitlichen Auflagern sind auch die Kipphalterungen im Modell erfasst. Diese dienen dazu, sämtliche Verschiebungen der Elemente aus der Ebene des Stegs zu sperren. Die Belastung des virtuellen Trägers wird in diesem Modell als aufgezwungene Verformung angenommen, was einem maximalen Weg von 750 mm bei den beiden mittleren Kräfteinleitungspunkten entspricht. Dabei wird diese Verformung in Form einer Rampenfunktion sukzessiv auf den Träger angewandt. Mit einer freien Spannweite L des Trägers von 5 m ergibt dieser aufgezwungene Weg eine maximale Rotation beim Auflager von rund 22° .

Um ein realitätsnahes Verhalten der FEM-Träger zu erhalten, ist es von zentraler Bedeutung Imperfektionen im Modell zu berücksichtigen. Im Rahmen dieser Arbeit werden die Abweichungen aus der Soll-Lage im Modell mit den Verformungsfiguren der Eigenfrequenzformen angenommen. Im Englischen werden diese Eigenfrequenzformen als «Modeshapes» bezeichnet und werden im Rahmen

dieses Berichtes auch als «Modes» abgekürzt. Somit ist es nötig vor den eigentlichen Berechnungen der Träger eine «Linear Buckling Analysis» (LBA) am Träger durchzuführen. Die Ergebnisse dieser LBA sind am Beispiel des QSK 3 Trägers in Figur 13 dargestellt. Dabei ist zu erkennen, dass sich die Verformungsfigur auf den Flanschbereich des Mittelfeldes beschränkt, denn die roten Linien markieren die Stellen der beiden mittleren Rippen. Mode 1 nimmt die Form einer punktsymmetrischen Beulwelle im oberen Druckflansch an. Mode 2 zeigt die identische Form, jedoch im Bereich des unteren Zugflansches. Mode 3 zeigt hingegen drei Beulhalbwellen wiederum im Druckflansch des Trägers.



Figur 13: Beispiel der Verformungsfiguren der ersten drei Eigenschwingformen (Mode 1, 2 und 3) des QSK 3 Trägers mit der Position der mittleren Rippen in rot

Nun kann in der Modellierung des effektiven Modellträgers eine dieser Imperfektionen als initiale Vorverformung angesetzt werden, wobei deren Amplitude beliebig gewählt werden kann. Mit dieser Ausgangslage kann die Berechnung gestartet werden. Nach deren erfolgreichen Abschluss können folgende Daten aus der virtuellen Trägeruntersuchung gewonnen werden:

Die verformte Figur des Modellträgers kann mit der Verformungsfigur aus dem physischen Experiment verglichen werden. Dabei ist darauf zu achten, dass die Figuren bei gleichen Durchbiegungen verglichen werden. Bei den Knoten, wo die Auflager der Träger definiert wurden, können die Reaktionskräfte und die Rotationen herausgelesen werden. Über die Bildung der Summe dieser Reaktionskräfte und der Länge der Randfelder kann das Moment gegenüber der Rotation dargestellt werden. Somit ist es möglich, das Momenten-Rotationsverhalten aus einer reinen FEM-Modellierung abzuleiten, welches im Anschluss mit dem Verhalten aus dem Experiment verglichen werden kann.

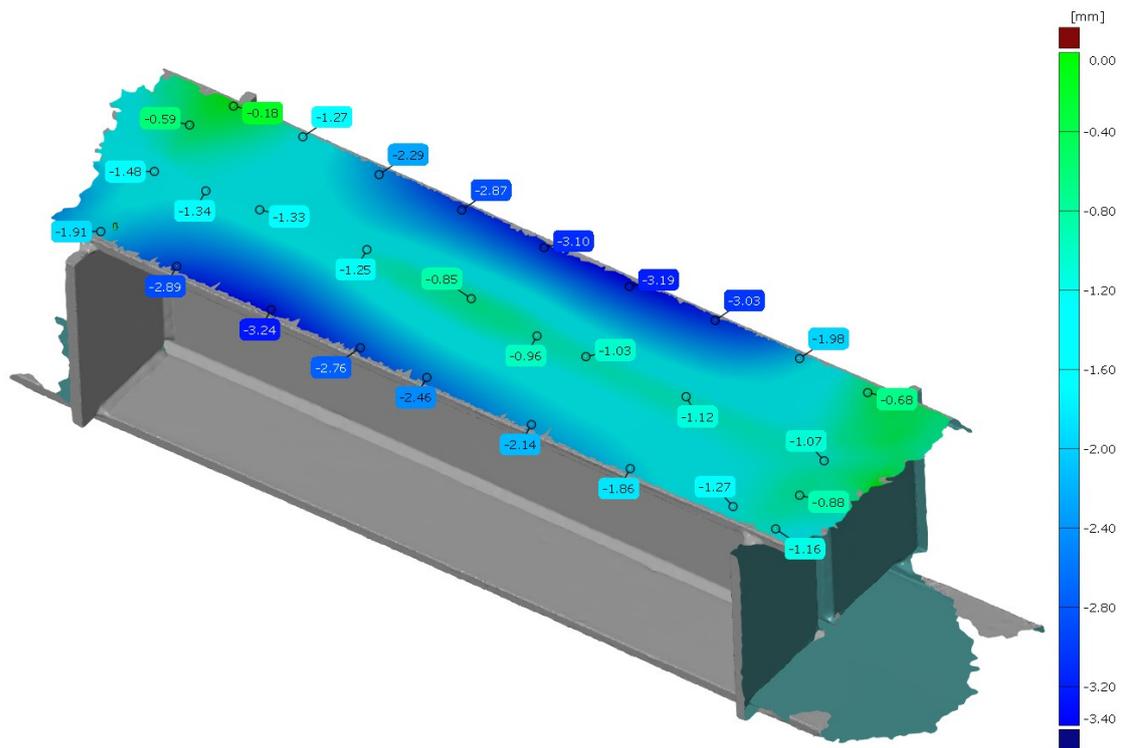
Ein Ziel dieser Arbeit ist es, die realitätsnahe Abschätzung des Bauteilverhaltens anhand von numerischen Berechnungen vorherzusagen. Um dies zu erreichen, werden zwei Input-Parameter variiert, um eine möglichst gute Übereinstimmung des FEM-Modells und der Experimentdaten zu erhalten. Der eine Parameter stellt die Wahl der Imperfektionsform dar, wobei jeweils die ersten drei Eigenfrequenzformen untersucht werden (siehe Figur 13). Als weiteres Ziel soll der Einfluss der Amplitude dieser Imperfektionsform auf das Momenten-Rotationsverhalten des Trägers erforscht werden. Dazu werden die drei Werte 0.4 mm, 0.63 mm bzw. 1 mm für das Mass der Amplitude der Imperfektion durchgespielt.

4 Resultate

4.1 Physische Experimente

4.1.1 3D Scanning des Mittelfeldes

Um die effektiv vorhandenen Abweichungen aus der Soll-Lage zu quantifizieren, wird vor dem Versuch eine 3D-Aufnahme des Mittelfeldes gemacht. Dabei werden die vertikalen Abweichungen zwischen der horizontalen Soll-Ebene und der gescannten Ist-Fläche der Flansche ermittelt. Bei der Auswertung liegt der Fokus auf dem oberen Druckflansch, da dieser für die lokalen Instabilitäten während des Versuches massgebend wird. Als Beispiel werden die Ergebnisse des S355J2N_QSK_3 Trägers gezeigt, welche unten in Figur 14 abgebildet sind. Die analogen Resultate sind für sämtliche Träger in Anhang C aufgeführt.



Figur 14: Differenzen in Millimeter von der Ist-Lage zur Soll-Lage des oberen Druckflansches des S355J2N_QSK_3 Trägers

In Figur 14 ist zu erkennen, dass die Soll-Höhe h von 300 mm entlang des Stegs besser eingehalten wird als an den Flanschrändern. So variieren die vertikalen Abweichungen über dem Steg bis zu rund 1 mm. Hingegen sind die freien Enden der Flansche in die Richtung der Profilmittle verzogen. Diese Deformationen sind über die Länge des Mittelstücks nicht konstant und die Abweichungen aus der Soll-Lage variieren bis zu einer Amplitude von rund 3 mm.

Es kann generell festgehalten werden, dass die QSK 3 Träger mit breiteren Flanschen grössere Abweichungen zeigen. Diese Differenzen bewegen sich in einer ähnlichen Grössenordnung wie jene in Figur 14, allerdings können die Maximalwerte an anderen Stellen der freien Flanschränder auftreten. Bei den QSK 1 Trägern können die vertikalen Unterschiede von der Ist- zur Soll-Lage demgegenüber Werte von rund 2 mm erreichen. Dabei sind die Abweichungen über dem Steg und den Rippen kleiner als jene bei den freien Enden der Flanschränder (siehe Anhang C).

4.1.2 Verformungsverhalten der Träger

Die Figuren 15 bis 17 sollen einen Eindruck vermitteln, wie die physischen Experimente an den QSK 1 Trägern abliefen. Als Beispiele werden die Träger mit den Stahlsorten S460M und S355M_SF verwendet, wobei die Träger S355J2N und S355M ein sehr ähnliches Verhalten zeigten, wie der S460M. Für weitere Illustrationen der Versuche sei auf Anhang D verwiesen.

In Figur 15 ist zu sehen, wie sich die Ausgangslage und die installierte Messtechnik für die beiden Träger beim Start des Versuches präsentierte. Als nächstes zeigt Figur 16, dass die Träger der QSK 1 erst bei beträchtlichen Durchbiegungen erste Anzeichen von lokalen Instabilitäten im oberen Druckflansch zeigten. Dabei bildete sich beim S460M_QSK_1 eine lokale Beulhalbwelle im abgewandten Teil in der Mitte des Druckflansches aus. Zudem kam es zu einer leichten Verkippung des mittleren Teilstücks nach vorne. Das gespiegelte Verhalten konnte am S355M_SF_QSK_1 Träger beobachtet werden. So zeigte sich eine lokale Beulhalbwelle im zugewandten Bereich und eine Verkippung nach hinten (siehe Figur 16 rechts). Diese beiden Phänomene nahmen während des weiteren Versuchsverlaufs an Magnitude zu. In Figur 17 ist die Endsituation der beiden verformten QSK 1 Träger sichtbar (aus der Perspektive von oben auf die Flansche). Es ist klar zu erkennen, dass sich die Träger um einige Zentimeter horizontal aus der initialen vertikalen Stegebene verschoben haben. An dieser Stelle ist hervorzuheben, dass sich die Mittelbereiche der Träger S355J2N, S355M und S460M nach vorne verkippten und der S355M_SF nach hinten auswich.

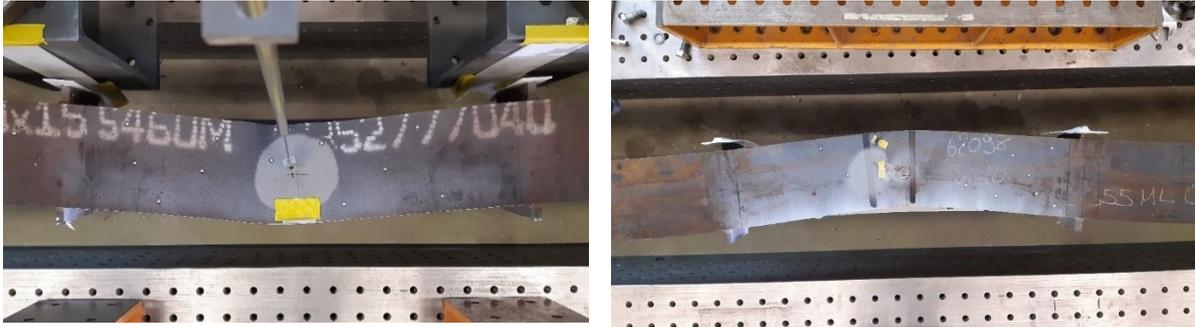
Die massgebenden lokalen Instabilitäten und grossen plastischen Verformungen traten bei den QSK 1 Trägern im Mittelfeld auf. Wobei sich die Instabilitäten zum grössten Teil auf den Druckflansch und den Steg beschränkten. Die Randfelder blieben in ihrer Längsachse beinahe gänzlich gerade und zeigten keine grossen plastischen Verformungen.



Figur 15: Ausgangslage der physischen Experimente vor dem Start mit fertigem Aufbau und installierter Messtechnik am Beispiel des S460M_QSK_1 (links) und S355M_SF_QSK_1 (rechts)



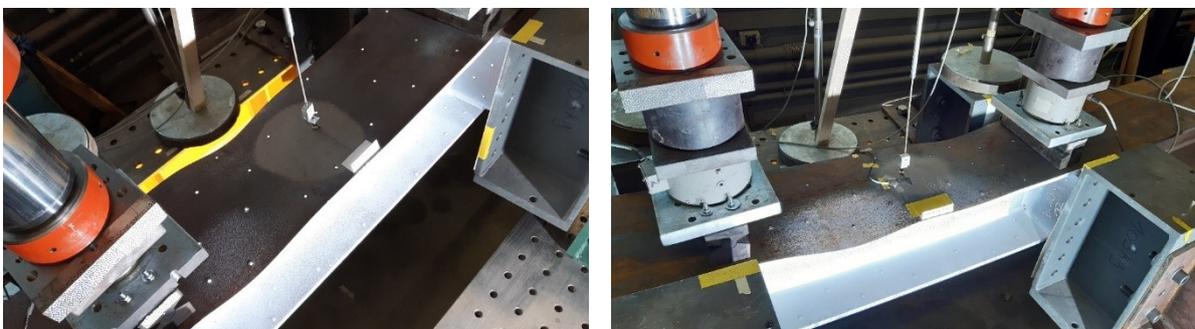
Figur 16: Erste Anzeichen von lokalen Instabilitäten im Druckflansch am Beispiel des S460M_QSK_1 (links) und S355M_SF_QSK_1 (rechts)



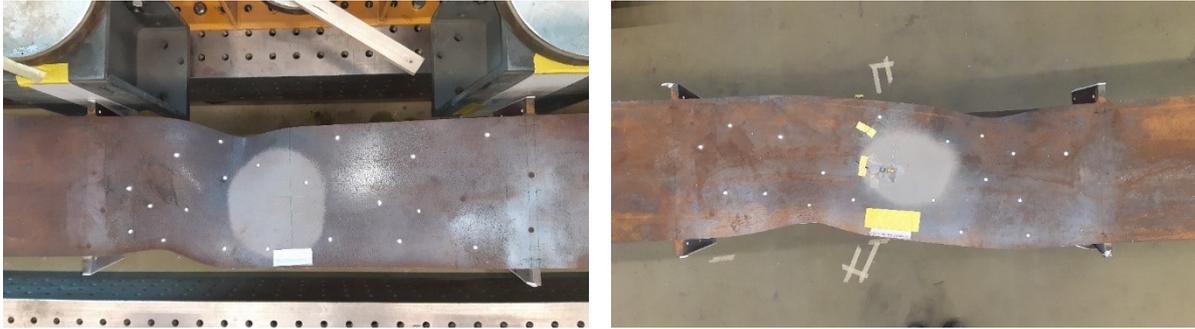
Figur 17: Verformungsfigur aus der Draufsicht am Ende des Versuches am Beispiel des S460M_QSK_1 (links) und S355M_SF_QSK_1 (rechts)

Der Versuchsablauf der QSK 3 Träger wird in den Figuren 18 und 19 an den Trägern aus S460M und S355M_SF verdeutlicht. Dabei wurden lediglich die Abstände der Kipphalterungen im Prüfaufbau auf die breiteren Träger angepasst. Somit zeigte sich die Ausgangslage beinahe identisch zu jener der QSK 1 Träger. Im Rahmen dieser vier getesteten Träger der QSK 3 Reihe zeigten die Träger aus S355M und S460M sowie die Träger aus S355J2N und S355M_SF ein paarweise ähnliches Verhalten. Für weitere Bilder während der Versuche sei wiederum auf Anhang D verwiesen.

Im Vergleich zu den Trägern der QSK 1 zeigten die QSK 3 Träger bereits bei kleineren Durchbiegungen erste lokale Instabilitäten im Druckflansch. So ist im linken Bild von Figur 18 zu erkennen, dass sich zwei leicht versetzte Beulhalbwellen im Mittelfeldflansch in der Nähe der linken Hydraulikpresse ausbildeten. Beim S355M_SF_QSK_3 bildeten sich ebenfalls zwei Beulhalbwellen im Mittelfeld, jedoch waren diese punktsymmetrisch über die Mitte gespiegelt. Es entstand je eine bei einer Presse, wobei der deformierte Flansch in den Träger hinein zeigte (siehe Figur 18 rechts). Diese beiden Phänomene nahmen während dem Versuchsverlauf wiederum an Magnitude zu. Figur 19 zeigt die Endsituation der beiden verformten QSK 3 Träger aus der Draufsicht. Man erkennt, dass bei den QSK 3 Trägern aus S460M und S355M die Plastifizierung grösstenteils in der Nähe der linken Hydraulikpresse im Mittelfeld auftrat. Dies bedeutet, dass diese zwei Träger eine asymmetrische Verformungsfigur zeigten. Im Gegensatz dazu konnte bei den anderen beiden QSK 3 Trägern im Wesentlichen eine symmetrische Durchbiegung beobachtet werden. Im Vergleich zu den Trägern der QSK 1 kam es bei diesen weniger zu einem globalen Verkippen aus der Stegebene und mehr zu lokalen Verdrehungen in der Längsachse. In Figur 19 ist erkennbar, dass die Versagensart bei den QSK 3 Trägern mehr durch zwei lokale Tordierungserscheinungen um die Längsachse im Mittelfeld eintrat. Die Randfelder blieben auch bei den QSK 3 Trägern gänzlich frei von grösseren plastischen Verformungen, wodurch sich diese wiederum auf den Druckflansch und Steg des Mittelfelds beschränkten.



Figur 18: Erste Anzeichen von lokalen Instabilitäten im Druckflansch am Beispiel des S460M_QSK_3 (links) und S355M_SF_QSK_3 (rechts)



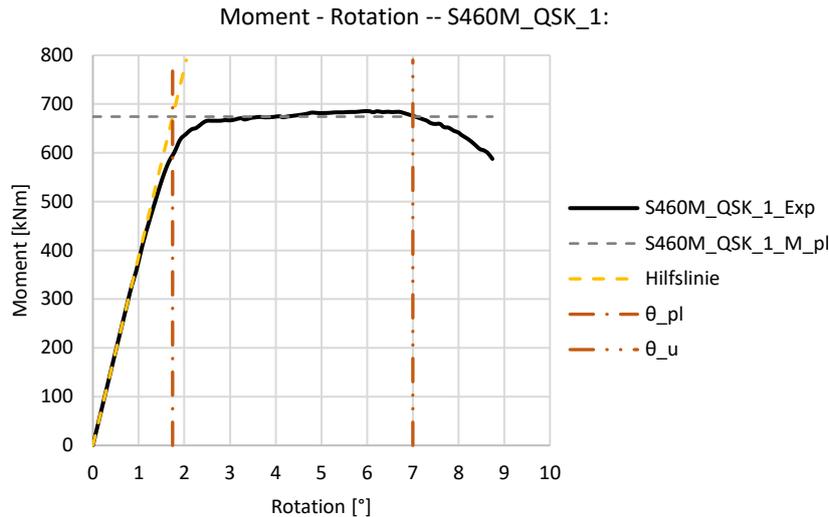
Figur 19: Verformungsfigur aus der Draufsicht am Ende des Versuches am Beispiel des S460M_QSK_3 (links) und S355M_SF_QSK_3 (rechts)

Zum Ablauf dieser Versuche muss angemerkt werden, dass bei beiden QSK 1 und 3 Trägern des neuen Slimfit-Stahls, der Versuch nicht bis zum gewünschten Wert von θ_u gefahren werden konnte. Der Grund dafür war, dass beide Träger sehr grosse Durchbiegungen erreichten und die Kipphalterungen durch kleine horizontale Ausweicherscheinungen leicht verschoben wurden. Dies führte lokal zum Durchscheuern der vertikalen Teflon-Lamellen, wodurch sich die Träger noch weiter verkippen konnten. Folglich konnte die Kraft nicht mehr direkt vertikal eingeleitet werden. Um den Prüfaufbau nicht zu beschädigen, mussten deshalb die Versuche für den S355M_SF_QSK_1 und den S355M_SF_QSK_3 Träger vor dem Erreichen von θ_u gestoppt werden.

Es sei darauf hingewiesen, dass keine der physisch getesteten Träger ein sprödes Versagen zeigte. So kam es im Gegensatz zu den Versuchen von H. S. Joo et al. [3] bei keinem der acht getesteten Träger zu einem Riss an den Stellen der eingeschweissten Rippen im Zugflansch.

4.1.3 Momenten-Rotationsverhalten

Aus den Daten der Kraftmessdosen und der Inklinometer kann das Momenten-Rotationsverhalten der Träger im Versuch dargestellt werden. Am Beispiel des S460M_QSK_1 Trägers, welcher in Figur 20 dargestellt ist, wird illustriert, wie die jeweiligen Rotationen θ_{pl} und θ_u aus dem Experimentverlauf gewonnen werden. In dieser Darstellung des aufnehmbaren Momentes in der y-Achse gegenüber der gemessenen Rotation des Trägers auf der x-Achse, ist in schwarz das Verhalten des Trägers dargestellt. Man erkennt im ersten Bereich eine lineare Steigung, die von der Hilfslinie verlängert wird. Der Rotationswert aus dem Schnittpunkt der Hilfslinie mit dem plastischen Widerstandsmoment M_{pl} ergibt eine Rotation von 1.74° für θ_{pl} . Der Rotationswinkel θ_u beim Unterschreiten von M_{pl} von 7° kann ebenfalls aus Figur 20 herausgelesen werden. Mit diesen beiden Werten und Formel 4 ist es möglich, die Rotationskapazität R dieses Trägers mit einem Wert von 3 zu quantifizieren. Nebst diesen Werten kann auch das maximal mögliche Moment M_{peak} des Trägers herausgelesen werden, welches für den S46M_QSK_1 Träger nur leicht über M_{pl} liegt.



Figur 20: Beispiel des Momenten-Rotationsverhaltens am Träger S460M_QSK_1 zur Verdeutlichung, wie θ_{pl} und θ_u aus den Experimentdaten hervorgehen

Dieses Vorgehen kann in analoger Form für die weiteren sieben Träger angewendet werden. Die wichtigsten Resultate und Kennzahlen aller Experimente sind in Tabelle 3 zusammengestellt. Die Werte für M_{peak} und R sind dabei hervorgehoben, da diese später für den Vergleich zwischen dem FEM-Modell und der Literatur wiederverwendet werden. In Tabelle 3 können die Rotationskapazitäten miteinander verglichen werden, wobei auffällt, dass der S355J2N-Stahl jeweils höhere Werte erreicht als die Träger aus S460M und S355M. Alle vier Träger der QSK 1 können den geforderten Wert von 3 gemäss Norm erfüllen. Die QSK 3 Träger haben tendenziell kleinere Werte für die Rotationskapazitäten als jene der QSK 1. Wie bereits am Ende von Kapitel 4.1.2 erwähnt, konnten für die Rotationskapazitäten der beiden Slimfit-Träger nicht direkt Werte ermittelt werden.

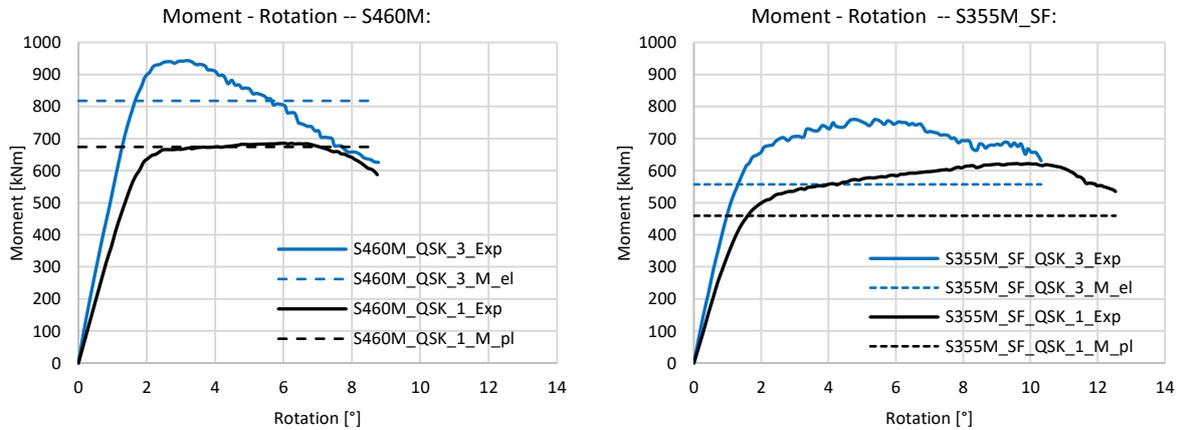
Tabelle 3: Zusammenstellung der wichtigsten Resultate aus den physischen Experimenten

Stahlsorte	QSK 1				QSK 3			
	S355J2N	S460M	S355M	S355M_SF	S355J2N	S460M	S355M	S355M_SF
$M_{peak,Exp}$ [kNm]	520	685	663	622	627	943	877	760
$\theta_{el,Exp}$ [°]	-	-	-	-	1.4	1.46	1.36	1.06
$\theta_{pl,Exp}$ [°]	1.28	1.74	1.48	1.21	-	-	-	-
$\theta_{u,Exp}$ [°]	10.5	7	8.75	N/A	8	5.65	5.9	N/A
R_{Exp} [-]	7.2	3	4.9	N/A	4.7	2.9	3.3	N/A

Es ist nun möglich, die jeweiligen Träger aus den gleichen Stahlsorten, aber mit unterschiedlichen Profilgeometrien, im Momenten-Rotationsdiagramm miteinander zu vergleichen. Dieser Vergleich von QSK 1 und QSK 3 wird anhand der beiden Stahlsorten S460M und S355M_SF in Figur 21 erläutert. Für die Diagramme der anderen beiden Stahlgüten sei auf Anhang E verwiesen.

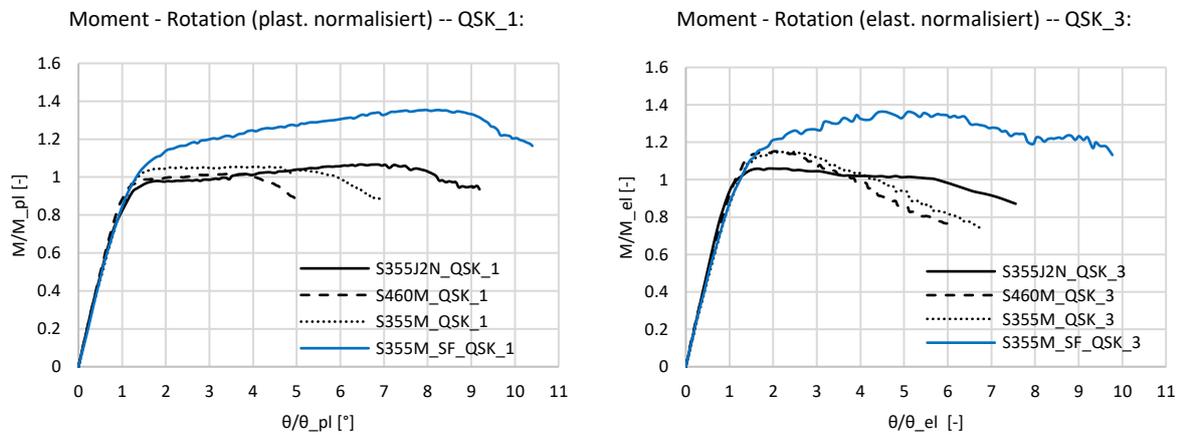
In beiden Diagrammen von Figur 21 ist erkennbar, dass die Anfangssteigung im Diagramm der QSK 3 Träger steiler ist als jene der QSK 1 Träger. Der S460M_QSK_3 erreicht einen sehr grossen Momentenwiderstand von über 900 kNm, jedoch fällt dieser Widerstand nach Erreichen von M_{peak} schnell wieder ab. Dies führt dazu, dass beide QSK 1 und 3 Träger aus S460M bei einer Rotation von 8° einen ähnlichen Momentwiderstand aufweisen. Im rechten Diagramm von Figur 21 kann herausgelesen werden, dass der S355M_SF_QSK 3 Träger sein M_{peak} bei kleineren Rotationen erreicht als jener mit QSK 1 Geometrie. Der anschliessende Abfall des Momentwiderstandes des QSK 3 Trägers

führt dazu, dass bei einer Rotation von mehr als 10° die beiden Träger aus Slimfit-Stahl wiederum das gleiche Moment aufnehmen können. Aus dem rechten Diagramm von Figur 21 geht hervor, dass die Träger aus dem neuen Slimfit-Stahl deutlich grössere Rotationen mitmachen und dabei ihre Momentenwiderstände über grosse Rotationen halten oder gar noch leicht steigern können.



Figur 21: Gegenüberstellung des Momenten-Rotationsverhaltens der QSK 1 und 3 Profilgeometrie am Beispiel der Stahlsorten S460M (links) und S355M_SF (rechts)

Um zu beurteilen, in welchem Masse die jeweiligen Träger ihre elastischen bzw. plastischen Biegemomentenwiderstände erreichen, wird eine Normalisierung der beiden Achsen vorgenommen. Grund dafür ist, dass die Werte der erreichten Momentenwiderstände stark abhängig von der Fließspannung des verwendeten Stahls sind. Die Normalisierung in Figur 22 erfolgt dabei für die Momentenachse mit M_{pl} bzw. M_{el} und für die Rotationsachse mit θ_{pl} bzw. θ_{el} .



Figur 22: Momenten-Rotationsdiagramm mit normalisierten Achsen für den Vergleich zwischen den Stahlsorten für die Träger der QSK 1 (links) und der QSK 3 (rechts)

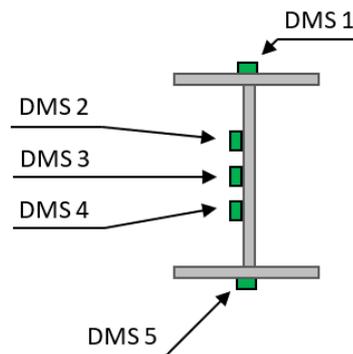
Die wichtigsten Erkenntnisse, welche aus den Daten von Figur 22 entnommen werden können, sind folgende:

- Sämtliche gängigen Stahlsorten mit einem QSK 1 Profil erreichen den plastischen Biegemomentenwiderstand. Dabei kann der S355J2N diesen über grosse Rotationen halten oder sogar noch leicht steigern. Die Stahlsorten S460M und S355M der QSK 1 können diesen demgegenüber lediglich halten und nicht noch weiter steigern.
- Der S355M_SF_QSK_1 hebt sich bezüglich des Momente-Rotationsverhaltens stark von den drei anderen Stahlsorten ab. Denn dieser übersteigt sein M_{pl} um knapp 40 %.

- Aus dem linken Diagramm dieser Abbildung kann somit abgeleitet werden, dass dieser Slimfit-Träger eine sehr grosse Rotationskapazität auf Bauteilebene erreichen wird auch wenn kein experimenteller Zahlenwert dazu eruiert werden konnte.
- Der S355J2N mit QSK 3 im rechten Diagramm erreicht gerade den elastischen Biege­widerstand. Im Gegensatz zur Modellvorstellung gemäss Figur 5 kann dieser M_{el} jedoch über Teile der Rotation aufrechterhalten.
- Der S460M und der S355M der QSK 3 erreichen nicht nur M_{el} sondern gar M_{pl} . Nach Erreichen von Letzterem fällt jedoch der Biege­widerstand schnell ab. Dieses Verhalten entspricht mehr demjenigen eines QSK 2 Profils als jenem eines QSK 3 nach Figur 5.
- Der Träger aus dem neuen Slimfit-Stahl mit einer Profil­geometrie der QSK 3 zeigt wiederum ein deutlich anderes Momenten-Rotationsverhalten als die drei handelsüblichen Stahlsorten derselben Querschnitts­klasse. So liegt der Momenten­widerstand um mehr als 30 % über M_{el} und das Moment kann über sehr grosse Rotationen aufrechterhalten werden.
- Wiederum ist keine genaue experimentelle Quantifizierung der Rotationskapazität dieses Trägers möglich. Doch ist ein viel grösserer R-Wert zu erwarten als bei den anderen drei Trägern dieser QSK 3 Versuchsreihe.

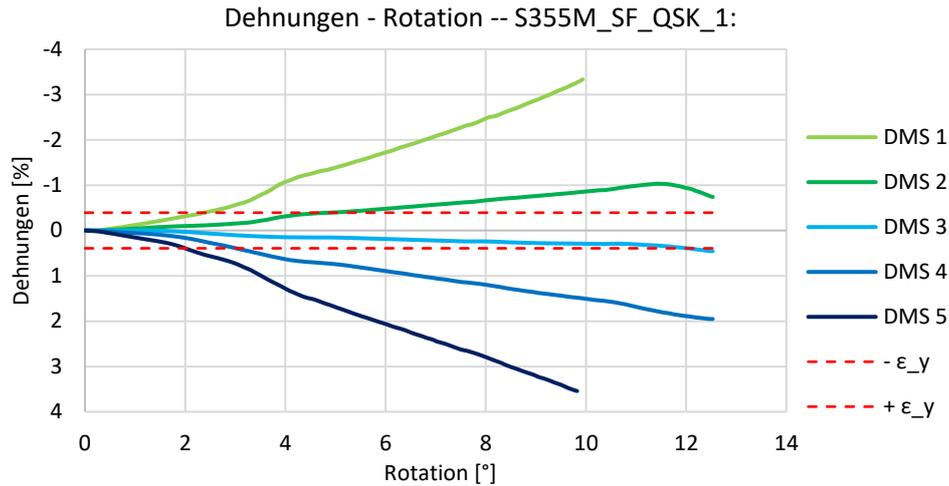
4.1.4 Messwerte aus DMS Messungen

Die Anordnung der Dehnungsmessstreifen (DMS) an den vier Trägern aus S355M der QSK 1 und 3 sowie S355M_SF der QSK 1 und 3 erfolgte wie in Kapitel 3.1.3 beschrieben. Figur 23 soll die Namensgebung der fünf verwendeten DMS veranschaulichen, welche in den folgenden Graphiken verwendet wird. An dieser Stelle ist daran zu erinnern, dass DMS 2 bis 4 auf der abgewandten Seite des Stegbleches angebracht wurden.



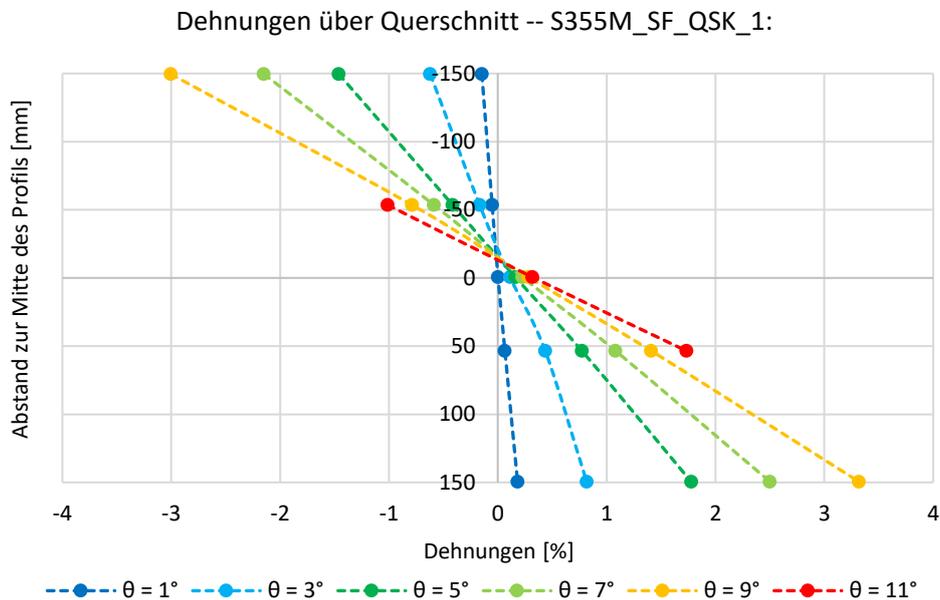
Figur 23: Schematische Darstellung der Anordnung und der Namensgebung der Dehnungsmessstreifen (DMS) über die Höhe des Trägers

Eine Möglichkeit, die im Versuch gemessenen Dehnungswerte darzustellen, besteht darin, den jeweiligen Verlauf der Dehnung über die zurückgelegte Rotation des Trägers darzustellen. Am Beispiel des S355M_SF_QSK_1 Trägers ist in Figur 24 erkennbar, wie die gemessenen Dehnungen fächerförmig über den Verlauf des Versuchs und somit über die zurückgelegte Rotation auseinanderlaufen. Es kann festgehalten werden, dass sich die Dehnungen auch nach Überschreiten der Fließdehnung ϵ_y weitgehend in einem linearen Trend fortsetzen. Zu beachten ist, dass die Dehnungswerte auf der Ordinate oberhalb der Abszisse negativ sind und somit Stauchungen darstellen.



Figur 24: Verlauf der Dehnungen der fünf DMS Messpunkte über die zurückgelegte Rotation am Beispiel des S355M_SF_QSK_1

Eine weitere Möglichkeit ist die Darstellung der Dehnungen in der Abszisse und der Abstand der DMS zur Mitte der Profilhöhe in der Ordinate. Der Verlauf der Dehnungen der fünf Messpunkte im Querschnitt des Profils ist für bestimmte Rotationen während des Versuchs in Figur 25 dargestellt. Die gestrichelten Linien verdeutlichen, dass die Dehnungen im Profil für die jeweiligen Rotationen tendenziell eben bleiben. Der Grund, dass die Dehnungen von DMS 1 und DMS 5 bei einer Rotation von 11° nicht im Diagramm vorkommen, ist, dass teilweise bei sehr grossen Verformungen die DMS beschädigt wurden und somit keine weiteren Messdaten mehr aufgezeichnet werden konnten. Die Dehnungsverläufe des ebenfalls ausgemessenen S355M_QSK_1 Trägers zeigten ein sehr ähnliches Verhalten wie jene Verläufe, welche in Figur 25 dargestellte sind.



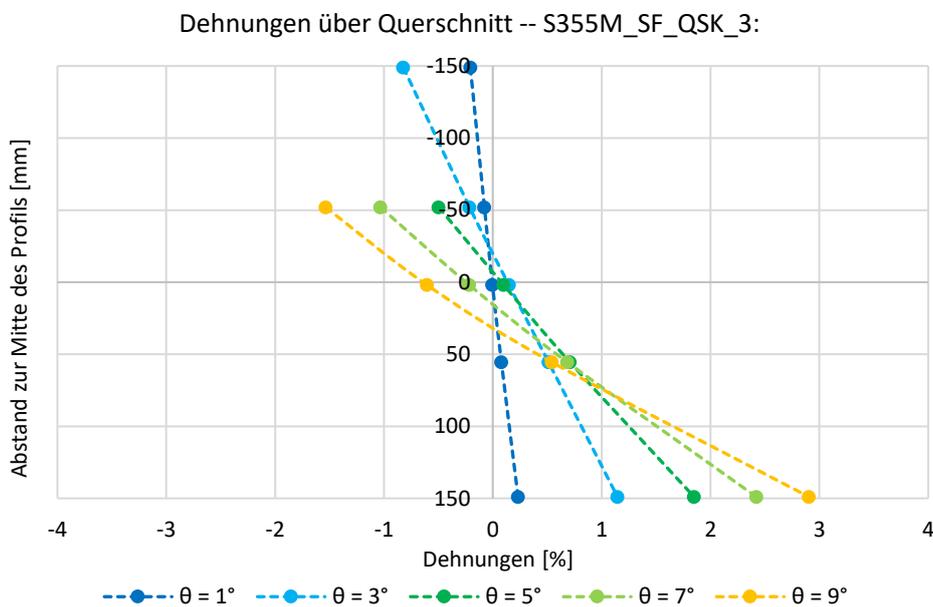
Figur 25: Darstellung der fünf DMS Messpunkte über die Profilhöhe bei unterschiedlichen Rotationen während des Versuches am Beispiel des S355M_SF_QSK_1

In Figur 26 ist die analoge Darstellung der fünf DMS Messpunkte für den Träger der identischen Slimfit-Stahlsorte jedoch mit der Profilgeometrie von QSK 3 gezeigt. In dieser Abbildung ist zu erkennen, dass die Ebenen aus den fünf Messpunkten bei einer Rotation unter 5° grösstenteils eben bleiben. Danach könnte diese Annahme möglicherweise nicht mehr ganz zutreffen, da eine leichte Krümmung

erkennbar wird. Da jedoch DMS 1 dieses Trägers aufgrund einer gebrochenen Lötstelle früh ausfiel, ist eine abschliessende Aussage nicht möglich.

Im Unterschied zu Figur 25 kann aus Figur 26 abgeleitet werden, dass es zu einer Verschiebung der Neutralachse in den unteren Bereich des Trägers kommt. Dies ist dadurch zu erkennen, dass sich der Schnittpunkt der gestrichelten Dehnungslinien mit der Ordinate in den unteren Teil der Abszisse verschiebt.

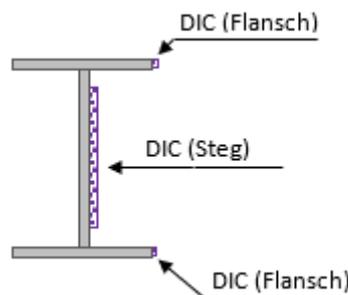
Die Dehnungsmesswerte aus den DMS des S355M_QSK_3 Trägers müssen aus der Datenauswertung ausgeschlossen werden. Grund dafür ist ein Fehler bei der Montage bzw. beim Klebevorgang der DMS-Streifen. In den Labornotizen wurde dazu festgehalten, dass die Reinigung der Oberfläche versäumt worden war. Daraus kann geschlossen werden, dass der Klebeverbund zwischen den DMS und der Stahloberfläche fehlerhaft war und somit keine zulässigen DMS Messdaten aus diesem Träger gewonnen werden konnten.



Figur 26: Darstellung der fünf DMS Messpunkte über die Profilhöhe bei unterschiedlichen Rotationen während des Versuches am Beispiel des S355M_SF_QSK_3

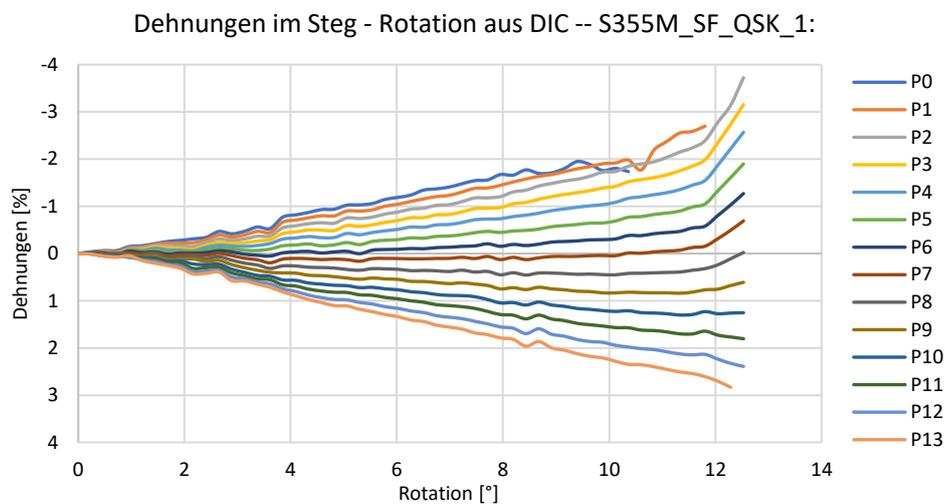
4.1.5 Messwerte aus DIC

Der geplante Messbereich der DIC Messungen umfasste ursprünglich grosse Teile des Stegs im Mittelfeld sowie die Ansichtsflächen der beiden Flansche (siehe Figur 27). Bei der Auswertung der Messdaten musste jedoch festgestellt werden, dass die Bereiche im oberen und unteren Flansch nicht ausgewertet werden konnten. Somit beschränken sich die Resultate auf die observierte Fläche im zugewandten Stegfeld.



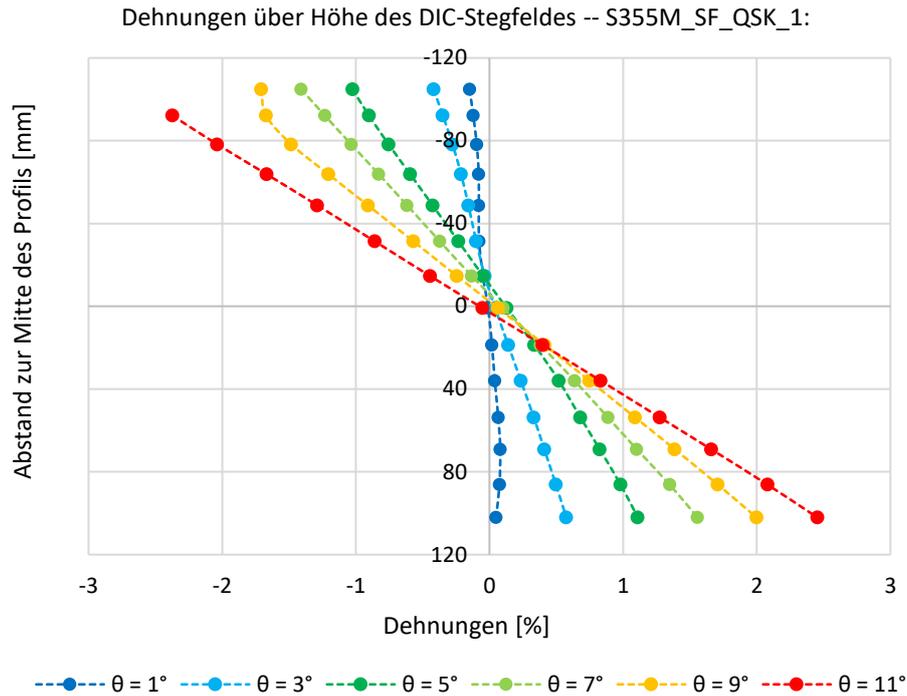
Figur 27: Schematische Darstellung der geplanten DIC-Messbereiche über die Höhe des Trägers

Im Gegensatz zur DMS Methode können nun im gesamten auswertbaren Stegfeld Messpunkte definiert und ausgewertet werden. So ist es möglich, diverse Dehnungsmessungen entlang der Steghöhe über den Versuchsablauf und somit die zurückgelegte Rotation darzustellen. Im Rahmen dieser Arbeit werden 14 Messpunkten in regelmässigem Höhenabstand über die DIC Stegfläche in der Mitte des Trägers ausgewertet. Analog wie in Figur 24 dargestellt, können die gemessenen Dehnungen aus der DIC Messmethodik aufgetragen werden, welche in Figur 28 dargestellt sind. Dabei sind die gleichen Anmerkungen für die Interpretationen der Achsen zu beachten wie bei Figur 24. Der Auswertungspunkt «P0» liegt dabei am oberen Rand der DIC Stegfläche und «P13» am unteren Rand. Figur 28 zeigt ähnlich wie Figur 24 einen regelmässigen Fächer, welcher über einen grossen Teil der Rotation gleichmässig aufgeht. Erst bei einer Rotation von über 12° kommt es zu einem Knick in den Dehnungsverläufen. Das Ausfallen einzelner Messpunkte steht im Zusammenhang mit dem Verlust der Korrelation im Tupfenmuster, was aber nur in wenigen Fällen vorkam.



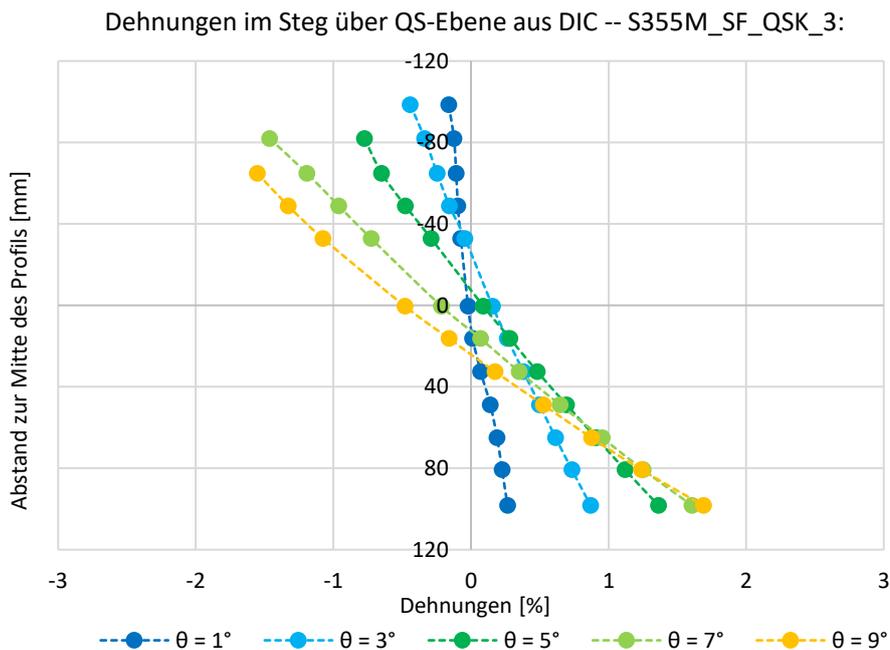
Figur 28: Verlauf der Dehnungen der 14 ausgewerteten DIC Messpunkte über die zurückgelegte Rotation am Beispiel des S355M_SF_QSK_1

In gleicher Manier wie in Figur 25 können die Dehnungsergebnisse aus der DIC Auswertung am Träger des S355M_SF_QSK_1 dargestellt werden. Diese sind in Figur 29 zu sehen, wobei die ausgewertete Höhe des DIC Stegfelds rund 220 mm betrug. In dieser Graphik bestätigen sich in noch detaillierterer Form die Erkenntnisse aus Figur 25. So bilden die Dehnungslinien bei gleicher Rotation beinahe perfekte Ebenen. Sogar bei grossen Rotationen von 11° und somit starken plastischen Verformungen des Querschnittes kann die Annahme von ebenbleibenden Querschnitten der Bernoulli-Theorie (vgl. Figur 3 bestätigt werden. Weiter ist in Figur 29 zu erkennen, dass es beim S355M_SF_QSK_1 Träger zu fast keiner Verschiebung der Neutralachse kommt.



Figur 29: Darstellung der 14 DIC Messpunkte über die Profilhöhe bei unterschiedlichen Rotationen während des Versuches am Beispiel des S355M_SF_QSK_1

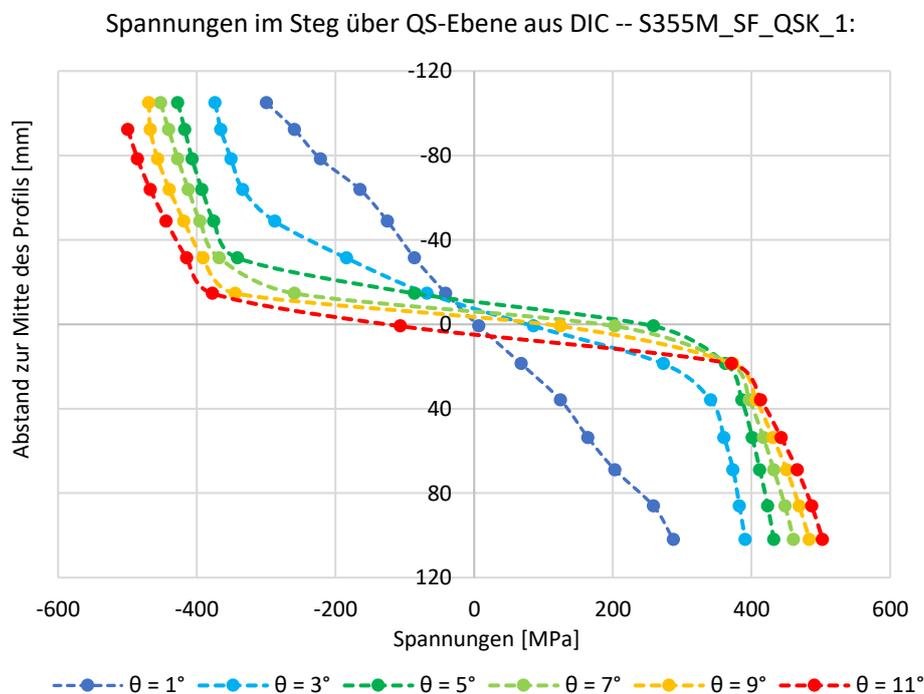
Analog zu Figur 26 können die Dehnungsebenen aus den DIC Daten für den S355M_SF_QSK_3 Träger ermittelt werden, welche in Figur 30 dargestellt sind. Aufgrund der grösseren Anzahl an Messpunkten ist es möglich, auch die höheren Rotationen auszuwerten. So zeigt sich, dass die Annahme einer ebenbleibenden Dehnungsebene bei kleinen aber auch grossen Rotation von bis zu 9° durchaus gerechtfertigt sind. Zudem wird bestätigt, dass sich die Neutralachse in den unteren Teil des Trägers verschiebt, da der Schnittpunkt zwischen den gestrichelten Linien und der Ordinate bei grösseren Rotationen nach unten wandert.



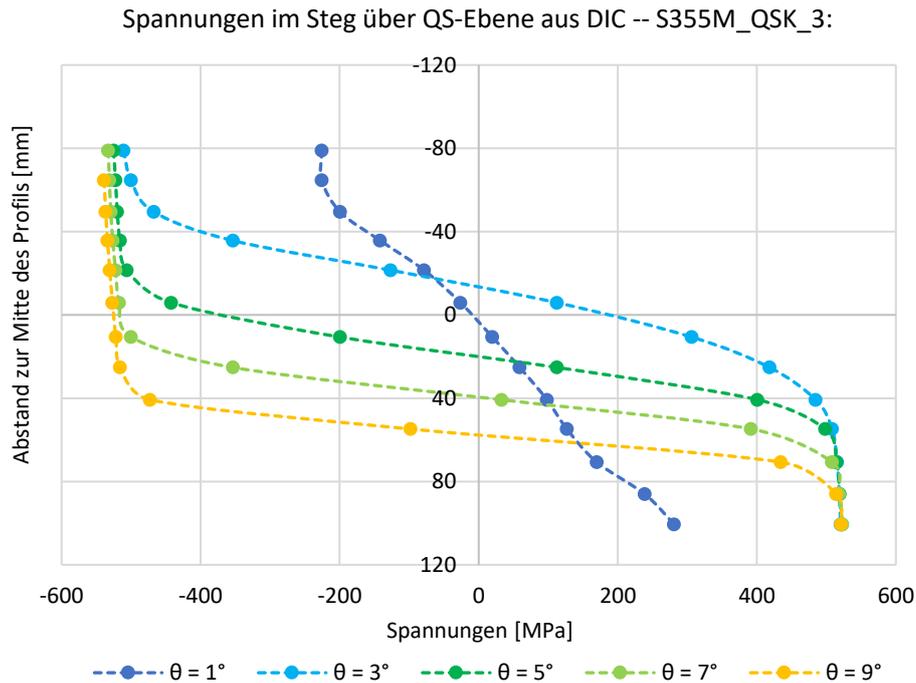
Figur 30: Darstellung der 10 DIC-Messpunkte über die Höhe des Profils bei unterschiedlichen Rotationen während des Versuches am Beispiel des S355M_SF_QSK_3

Mit den nun bekannten Dehnungen über die ausgewertete DIC Höhe und dem Wissen um die Spannungs-Dehnungsbeziehung der verwendeten Stahlsorten können die Spannungen berechnet werden. So ist in Figur 31 die Verteilungen der Spannungen des S355M_SF_QSK_1 Trägers über die ausgewertete DIC-Steghöhe zu sehen. In Figur 32 werden dieselben Parameter für den S355M_QSK_3 Träger gezeigt. Die ausgewerteten DIC Daten für die Träger S355M_QSK_1 und S355M_SF_QSK_3 sind in Anhang F angefügt. Die zentralen Punkte, welche aus diesen zwei Abbildungen herausgelesen werden können, sind folgende:

- Bei beiden Trägern stellt sich eine lineare Spannungsverteilung über den Querschnitt ein, solange die Belastungen im elastischen Bereich liegen. Dies ist an der dunkelblauen Linie bei einer Rotation von 1° erkennbar.
- Bei einer Steigerung der Last in den plastischen Bereich kommt es zu einer Annäherung an eine Spannungsverteilung mit konstanten Werten über die Höhe des Trägers. Dabei tritt diese «Viereckverteilung» gemäss Theorie (vgl. Figur 3) beim S355M etwas schneller ein als beim Slimfit.
- Somit kann die Theorieannahme von linearen Spannungen im elastischen Bereich und konstanten Spannungsblöcken im plastischen Belastungsbereich mit dieser Untersuchung bestätigt werden. Zum Vergleich ist dazu auf Figur 3 verwiesen.
- Da der neue Slimfit-Stahl ein ausgeprägtes verfestigendes Verhalten zeigt, bleiben die Spannungen nicht auf dem Wert der Fließspannung, sondern erhöhen sich noch weiter. So ist in Figur 31 bei den hohen Rotationen von 7° , 9° und 11° ein paralleler Verlauf zu sehen, wogegen sich die Spannungspunkte am Rand bei grossen Rotationen in Figur 32 überlagern.
- Zudem ist nur bei den QSK 3 Trägern zu erkennen, wie sich die Neutralachse nach unten verschiebt. Bei den QSK 1 Trägern lässt sich ein solches Verhalten nicht erkennen.

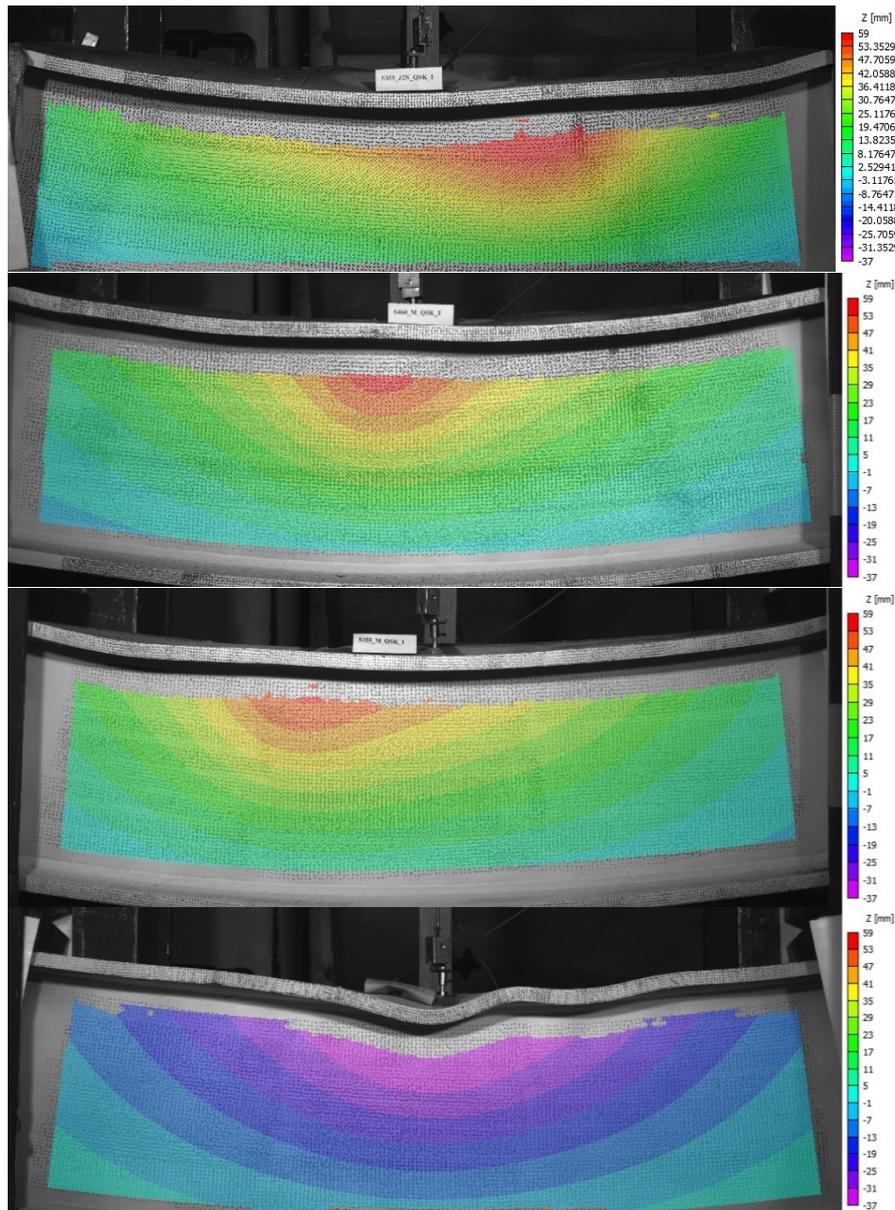


Figur 31: Spannungsverteilung über die Höhe des ausgewerteten DIC-Feldes des QSK 1 Trägers aus S355M_SF-Stahl



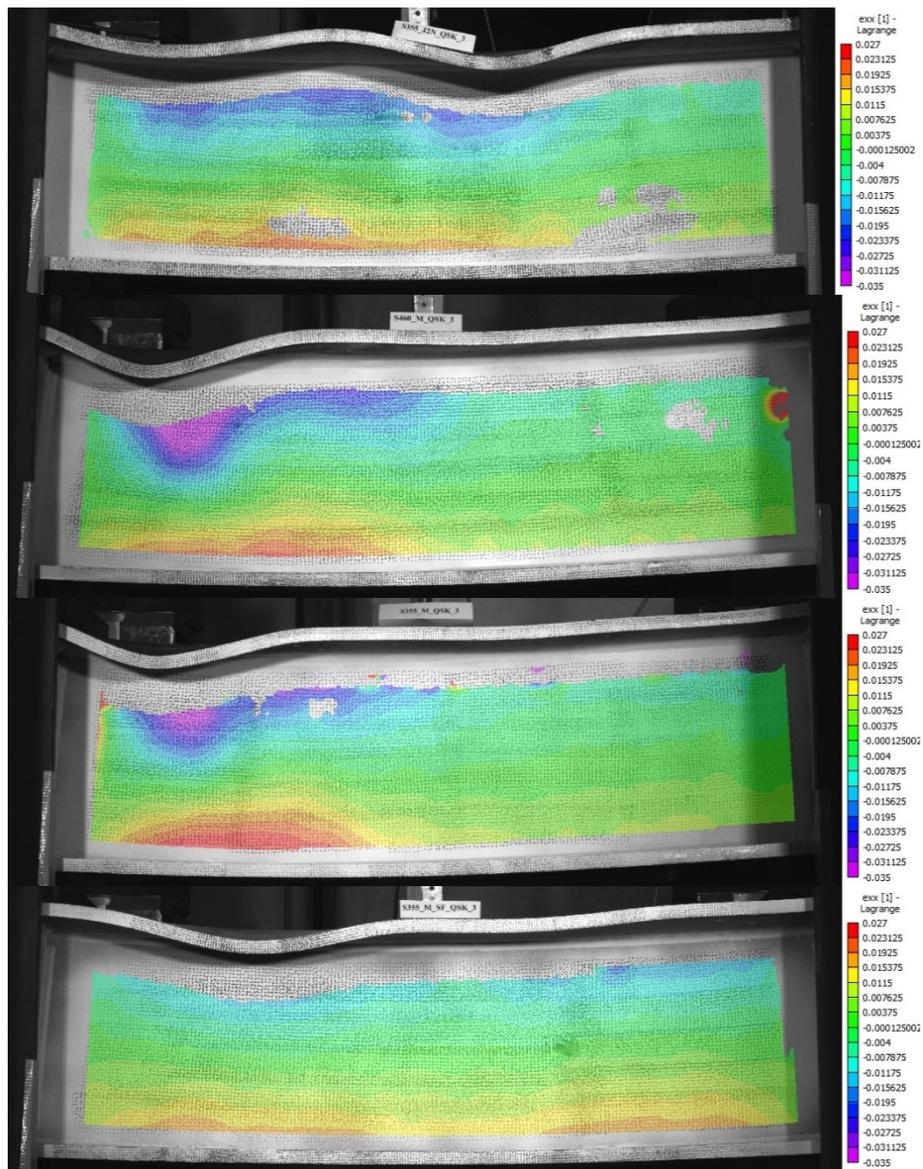
Figur 32: Spannungsverteilung über die Höhe des ausgewerteten DIC-Feldes des QSK 3 Trägers aus S355M-Stahl

Da mit Hilfe der DIC Messmethodik ein gesamtes Feld ausgewertet werden kann, ist es möglich, die Daten auch in Bildform zu präsentieren. So ist in Figur 33 die Verschiebung des Trägers aus der ursprünglichen Stegebene im Endzustand anhand der vier QSK 1 Träger gezeigt. Anhand dieser Daten kann nun das beobachtete Phänomen des «globalen Verkippens» aus dem Experiment mit Zahlen quantifiziert werden. Aus den ersten drei Bildern von Figur 33 lässt sich herauslesen, dass sich Teile des Stegs bis zu 59 mm nach vorne verschoben haben. Lediglich der QSK 1 Träger aus dem Slimfit-Stahl verwölbte sich bis zu 37 mm nach hinten.



Figur 33: Vergleich der Verschiebungen der QSK 1 Träger aus der ursprünglichen Stegeebene im Endzustand mit S355J2N (erstes Bild), S460M (zweites Bild), S355M (drittes Bild) und S355M_SF (viertes Bild)

Anstatt die Dehnungen punktuell auszuwerten, ist es auch möglich, die Orte der grössten Dehnungskonzentrationen im Mittelfeld des Stegs sichtbar zu machen. Dies ist in Figur 34 mit den Dehnungen in Trägerlängsrichtung der QSK 3 Testreihe gezeigt. Hier wurden die Werte allerdings nicht im Endzustand, sondern bei einer identischen Durchbiegung von 200 mm ausgelesen. Das zweite und dritte Bild in Figur 34 zeigen die Dehnungskonzentrationen im Steg des S460M_QSK_3 und S355M_QSK_3. Dabei wird deutlich, dass das asymmetrische Verhalten mit Zentrum bei der linken Hydraulikpresse auch zu einer lokalen Dehnungsspitze im Steg der beiden Träger führt. Im Vergleich dazu zeigen die beiden symmetrisch verformten Träger S355J2N_QSK_3 und S355M_SF_QSK_3 eine homogenere Verteilung der Dehnungen im Steg.



Figur 34: Vergleich der Dehnungen in Längsrichtung der QSK 3 Träger zum Zeitpunkt einer Durchbiegung in der Mitte von 200 mm mit S355J2N (erstes Bild), S460M (zweites Bild), S355M (drittes Bild) und S355M_SF (viertes Bild)

4.2 Numerische Berechnungen

4.2.1 Untersuchung der Input-Parameter Imperfektionsform und Amplitude

Wie in Kapitel 3.2 geschildert, wird angenommen, dass die Wahl der Imperfektionsform und deren Amplitude einen grossen Einfluss auf die Resultate haben. Diese Annahme wird in diesem Unterkapitel genauer untersucht. Dazu werden die Momenten-Rotationsergebnisse von drei untersuchten Imperfektionsformen (Mode 1, Mode 2 und Mode 3) dargestellt. Jede dieser drei angenommenen Imperfektionsformen wird dabei mit drei Werten für die Grösse der Amplitude durchgespielt (0.4 mm, 0.63 mm und 1 mm). Damit soll evaluiert werden, wie stark sich die beiden Input-Parameter auf die Momenten-Rotationsergebnisse auswirken.

Die Resultate dieser Untersuchung an den QSK 1 und QSK 3 Trägern der Stahlsorten S355M und S355M_SF sind anhand der Figuren 35 und 36 illustriert. Die Träger aus den anderen beiden Stahlsorten zeigen sehr ähnliche Ergebnisse und sind in Anhang G zu finden.

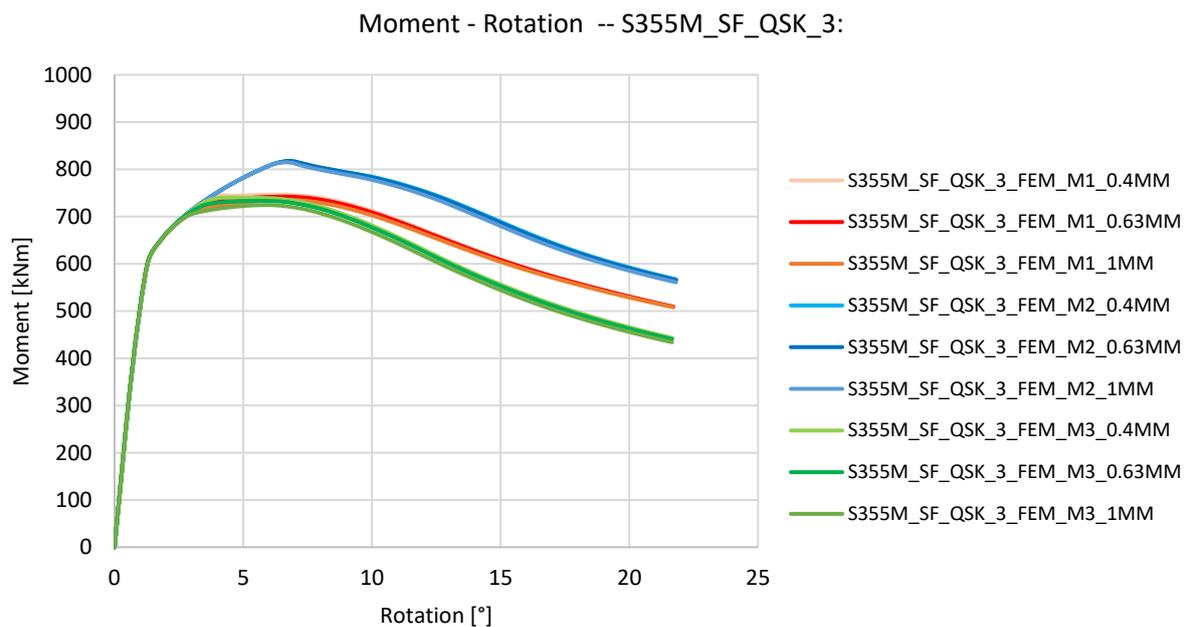
In Figur 35 sind die FEM-Berechnungen des S355M_QSK_1 Trägers zu sehen. Alle neun Modellträger zeigen im Momenten-Rotationsdiagramm zu Beginn eine identische Steigung. Es folgt ein Knick im Kurvenverlauf, nach welchem die Kurve noch leicht steigend ist. Anschliessend kommt es zu Unterschieden in den weiteren Verläufen der jeweiligen virtuellen Träger. Es bilden sich drei Gruppen von Kurven, welche ab einer Rotation von knapp 5° voneinander divergieren. Diese drei Gruppen stellen jeweils die Resultate einer der drei modellierten Imperfektionsformen dar. Daraus lässt sich erkennen, dass die drei verschiedenen Modes ab einer Rotation von mehr als 5° erhebliche Unterschiede im Momenten-Rotationsverhalten aufweisen. Somit stellt der Input-Parameter Imperfektionsform eine entscheidende Grösse dar, um das Momenten-Rotationsverhalten realitätsnahe abzubilden. Die drei Kurven der Modellträger mit jeweils identischer Imperfektionsform aber variiertes Amplitude sind dagegen beinahe deckungsgleich. Daraus kann geschlossen werden, dass der Input-Parameter Amplitude nur eine untergeordnete Rolle beim Momenten-Rotationsverhalten der numerischen Modelle spielt.

Diese Erkenntnisse zum Einfluss der Imperfektionsform und der Amplitude können anhand der FEM-Modellierungen der anderen QSK 1 Träger bestätigt werden. Dazu sei auf Anhang G verwiesen.



Figur 35: Momenten-Rotationsverhalten der FEM-Berechnungen der drei untersuchten Modes (M1, M2 und M3) und deren Variation mit Amplituden von (0.4 mm, 0.63 mm und 1 mm) dargestellt für den S355M_QSK_1 Träger

Ein ähnliches Bild zeigt sich für die QSK 3 Träger, deren Verhalten in Figur 36 verdeutlicht wird. In dieser Graphik sind die neun Momenten-Rotationskurven der S355M_SF_QSK_3 Modelle dargestellt. Die Kurven trennen sich hier bei einer Rotation von rund 3° und bilden drei separate Stränge. Diese drei Kurvenscharen stehen jeweils für eine der drei als Imperfektionsform angesetzten Eigenschwingfrequenzen (Modes). Dabei verlaufen die Kurven der Mode 2 Träger im Momenten-Rotationsdiagramm am höchsten und jene der Mode 3 Träger am tiefsten. Das Modellverhalten des Trägers mit Imperfektionsform nach Mode 1 liegt dabei zwischen den anderen beiden Kurvenscharen. Wiederum ist deutlich zu erkennen, dass es zu keiner signifikanten Änderung des Verhaltens kommt, wenn die Amplitude der Imperfektionen variiert wird. Dies ist daraus ersichtlich, dass die drei Kurven innerhalb einer Kurvenschar erneut beinahe deckungsgleich verlaufen.

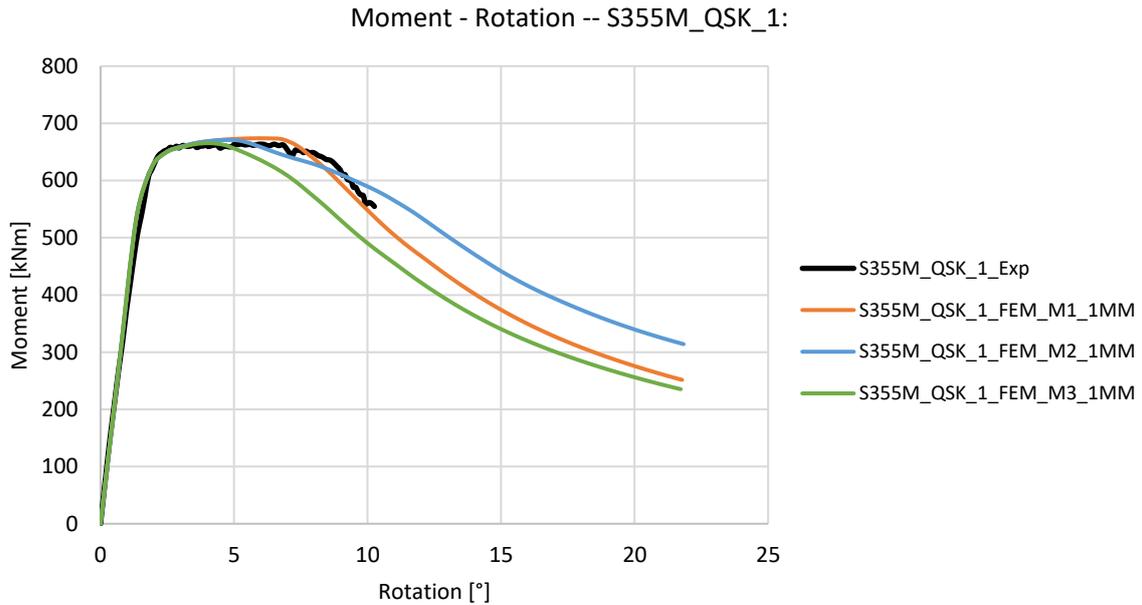


Figur 36: Momenten-Rotationsverhalten der FEM-Berechnungen der drei untersuchten Modes (M1, M2 und M3) und deren Variation mit Amplituden von (0.4 mm, 0.63 mm und 1 mm) dargestellt für den S355M_SF_QSK_3 Träger

4.2.2 Validierung der numerischen Berechnungen an den Experimentdaten

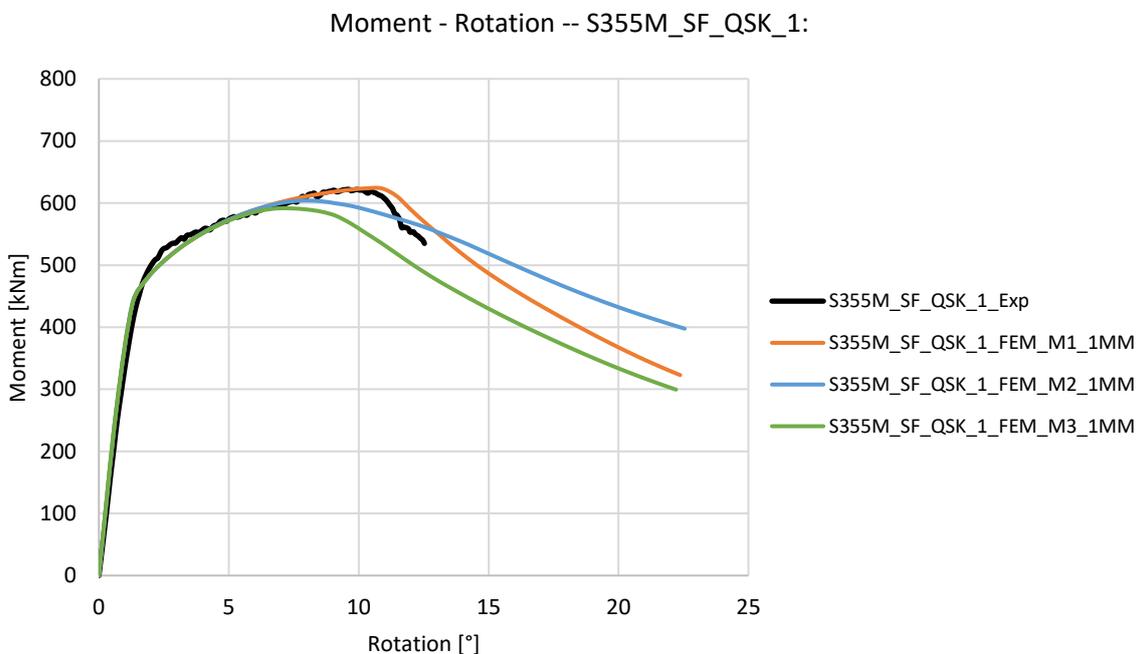
Wie in Kapitel 4.2.1 ausgeführt, sind die Resultate aus den numerischen Berechnungen in erster Linie von der gewählten Imperfektionsform abhängig. Die Unterschiede im Momenten-Rotationsverlauf infolge der angesetzten Amplitudengrösse sind demgegenüber vernachlässigbar. Um das Ziel einer realitätsnahen Prognose aus dem FEM-Modell zu erreichen, muss demzufolge die passende Imperfektionsform gewählt werden. Aus diesem Grund werden nun die drei Imperfektionsfiguren in Form der Eigenschwingfrequenzen (Modes) mit dem Verhalten der Träger aus den Experimenten verglichen. Dabei werden die Kurven der jeweiligen Modes mit einer Amplitude von je 1 mm mit dem Momenten-Rotationsverhalten des physischen Versuchsträgers zusammengeführt. Diese Vergleiche sind in den Figuren 37, 38, 40 und 42 dargestellt.

Aus Figur 37 und Figur 38 können Erkenntnisse zu den QSK 1 Trägern gewonnen werden, wobei diese beiden Träger aus S355M und S355M_SF repräsentativ für die beiden weiteren Träger aus S355J2N und S460M stehen. In Figur 37 ist zu sehen, dass die virtuellen Modelle mit Imperfektionen in Form von Mode 2 und Mode 3 zu früh an Biege widerstand verlieren. Dagegen kann das FEM-Modell mit Imperfektionsform nach Mode 1 mit einer Amplitude von 1 mm den Momenten-Rotationsverlauf des Experimentträgers sehr gut wiedergeben.



Figur 37: Vergleich der Momenten-Rotationsverläufe der drei Imperfektionsformen (M1, M2 und M3) der FEM-Modelle mit dem Verhalten des Experimentträgers S355M_QSK_1

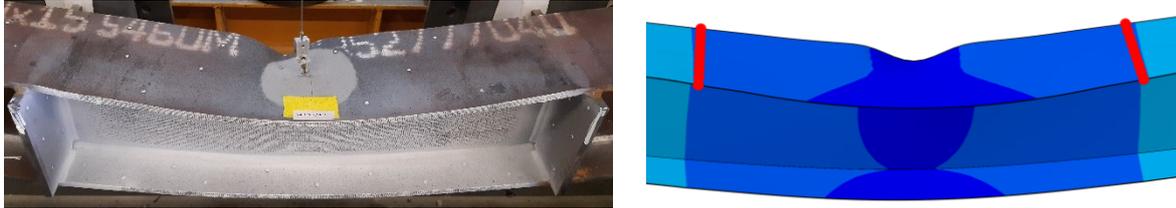
Figur 38 kann diese These am Beispiel des S355M_SF_QSK_1 Trägers bestätigen. Dazu ist hervorzuheben, dass im Experiment ein starker Abfall der Momentenkapazität bei einer Rotation von über 10° zu verzeichnen ist. Umso erfreulicher ist es deshalb, dass selbst dieses Verhaltens des Trägers sehr gut mit dem FEM-Modell nach Mode 1 reproduziert werden kann. Denn der Zeitpunkt, sprich die Rotation, bei der dieser Abfall auftritt, wird treffend vorhergesagt. Zudem zeigt der abfallende Verlauf dieses Modellträgers eine sehr ähnliche Neigung wie jene im Experiment.



Figur 38: Vergleich der Momenten-Rotationsverläufe der drei Imperfektionsformen (M1, M2 und M3) der FEM-Modelle mit dem Verhalten des Experimentträgers S355M_SF_QSK_1

Nebst dem Verhalten im Momenten-Rotationsdiagramm soll zudem untersucht werden, ob die Verformung des virtuellen Trägers ebenfalls mit jenem aus den Experimenten übereinstimmt. Diese Validierung kann anhand des Trägers S460M_QSK_1 bestätigt werden und ist in Figur 39 illustriert. In

dieser Abbildung ist die Verformung des Experimentträgers (links) und die Verformungsfigur des virtuellen Trägers (rechts) dargestellt. Der Vergleich erfolgt dabei bei einer identischen Durchbiegung der Träger von rund 360 mm. Im FEM-Modell ist eine Beulhalbwelle im hinteren Druckflansch zu sehen, sowie eine globale Verkipfung des Mittelfelds nach vorn. Diese Verformung stimmt mit der verformten Figur aus dem Experiment, dargestellt im linken Bild von Figur 39 überein. Die roten Linien im linken Bild markieren den Ort der mittleren Rippen im Träger.

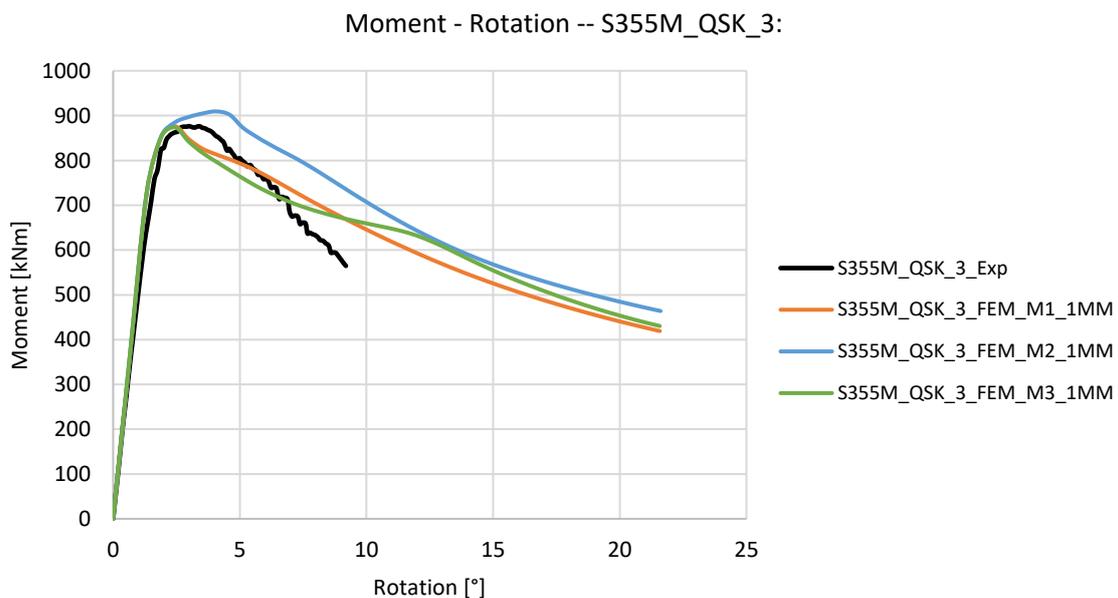


Figur 39: Gegenüberstellung der beiden Verformungsfiguren von Experiment (links) und FEM-Modell (rechts) im Mittelfeld des S460M_QSK_1 Trägers bei identischer Durchbiegung von rund 360 mm

Für die Modellierung von QSK 1 Trägern kann somit das jeweilige FEM-Modell mit einer Imperfektionsfigur in Form der ersten Eigenschwingfrequenz (Mode 1) mit einer Amplitudengröße von 1 mm angesetzt werden. Damit können realitätsnahe Prognosen für das Bauteilverhalten der QSK 1 Träger gemacht werden.

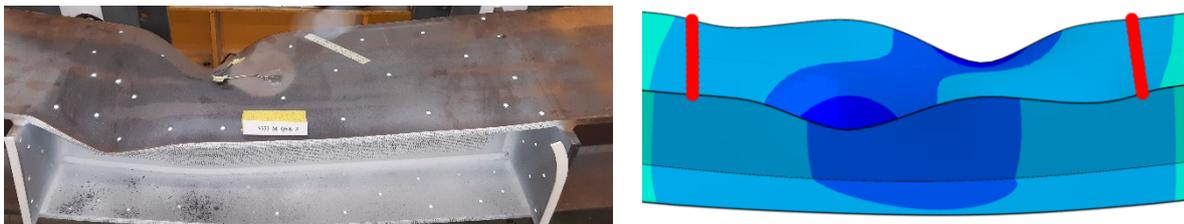
In analoger Form kann die Validierung des numerischen Modells an den Trägern der QSK 3 geführt werden. Die jeweiligen neun FEM-Modellkurven sind in den beiden Figuren 40 und 42 gezeigt. Dabei werden repräsentativ die Träger S355M und S355M_SF der QSK 3 Reihe gezeigt.

In Figur 40 ist der Momenten-Rotationsverlauf des S355M_QSK_3 Trägers dargestellt. Man erkennt, dass die drei FEM-Modelle in der initialen Steigung sehr ähnlich zum Experimentträger verlaufen. Bei einer Rotation von über 2° fallen die beiden virtuellen Träger mit Imperfektionen von Mode 1 und 3 schneller ab als jener von Mode 2. Der Verlauf des physischen Experimentträgers liegt dabei in der Mitte dieser beiden numerischen Verhalten. Der Experimentträger weist jedoch über die weiteren Rotationen bis 8° einen stärkeren Abfall des Momentenwiderstandes auf als es die Modelle aus der Numerik zeigen. Es ist zu vermerken, dass das maximale Moment M_{peak} von den Modellen mit der Imperfektionsform von Mode 1 und 3 sehr gut erfasst wird.



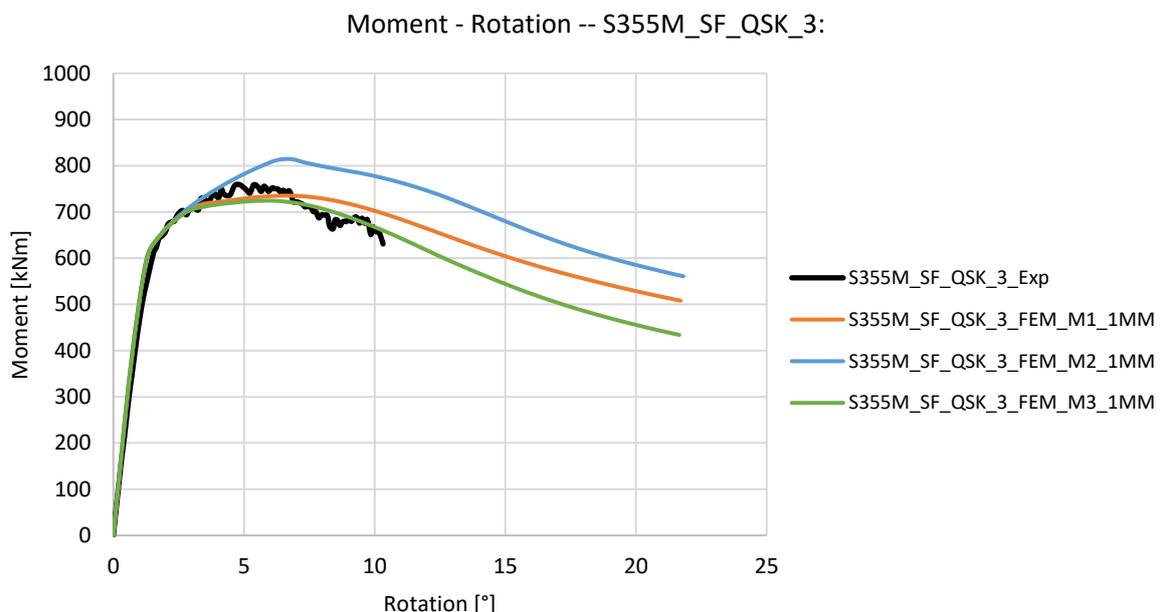
Figur 40: Vergleich der Momenten-Rotationsverläufe der drei Imperfektionsformen (M1, M2 und M3) der FEM-Modelle mit dem Verhalten des Experimentträgers S355M_QSK_3

Eine mögliche Erklärung für die leicht steilere Neigung der abfallenden Kurve des S355M_QSK_3 im Experiment aus Figur 40 kann über die Verformungsfigur gefunden werden. Aufgrund der asymmetrischen Verformung des Trägers im Experiment stimmt die Verformungsfigur nicht mit jenem aus der FEM-Berechnung überein (siehe Figur 41). Da sich die Plastifizierung im Experiment über einen kleineren Teil des Trägers lokalisiert, könnte es somit zu einem steileren Abfall des Momentenwiderstandes kommen. Im Gegensatz dazu ist im rechten Bild von Figur 41 zu erkennen, dass im FEM-Modell das gesamte Mittelstück zwischen den beiden rot angedeuteten Rippen verformt bzw. plastifiziert wird.



Figur 41: Gegenüberstellung der beiden Verformungsfiguren von Experiment (links) und FEM-Modell (rechts) im Mittelfeld des S355M_QSK_3 Trägers bei einer identischen Durchbiegung von 340 mm

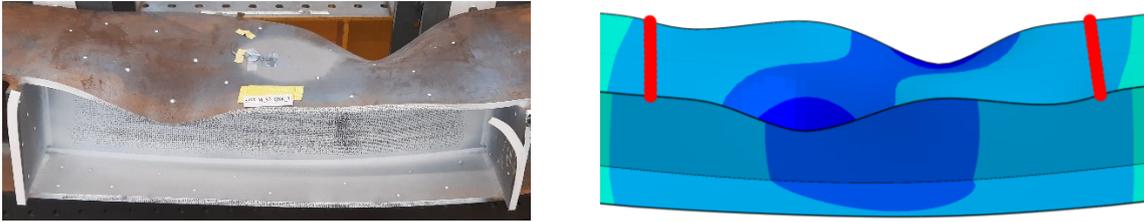
Die Momenten-Rotationsverhalten vom Experiment und den drei FEM-Modellen des S355M_SF_QSK_3 Trägers sind in Figur 42 dargestellt. Man erkennt, dass alle drei virtuellen Träger den Verlauf aus dem Experiment bis zu einer Rotation von rund 3° gut approximieren können. Danach verlaufen die Modelle mit Imperfektionen in Form von Mode 1 und Mode 3 flacher als jene von Mode 2. Dabei erreichen die beiden flacheren Modellkurven von Mode 1 und Mode 3 eine gute Übereinstimmung mit dem physischen Versuch. Dabei trifft jene Modellierung von Mode 1 M_{peak} präziser, hingegen beschreibt das Modell mit Imperfektionsform von Mode 3 den abfallenden Verlauf etwas besser. Da der Experimentträger jedoch einen leicht schwankenden Verlauf zeigt, ist anzunehmen, dass beide Modelle für eine Voraussage gut geeignet sind.



Figur 42: Vergleich der Momenten-Rotationsverläufe der drei Imperfektionsformen (M1, M2 und M3) der FEM-Modelle mit dem Verhalten des Experimentträgers S355M_SF_QSK_3

Die Verformungsfigur ist dabei für die beiden virtuellen Träger mit Imperfektionsformen von Mode 1 und Mode 3 identisch und in Figur 43 dargestellt. Im Vergleich zu Figur 41 zeigt Figur 43, dass die Verformungsfigur von physischem Experiment und virtuellem Modellträger bei gleicher Durchbiegung

von ca. 390 mm gut übereinstimmen. Anhand dieser zusätzlichen Übereinstimmung kann angenommen werden, dass das reale Verhalten der QSK 3 Träger durch die FEM-Modelle in annähernd gutem Masse abgebildet werden kann.



Figur 43: Gegenüberstellung der beiden Verformungsfiguren von Experiment (links) und FEM-Modell (rechts) im Mittelfeld des S355M_SF_QSK_3 Trägers bei gleicher Durchbiegung von rund 390 mm

Es kann zusammengefasst werden, dass die Modellierung der QSK 1 Träger anhand der FEM-Modelle mit Imperfektionsform von Mode 1 und einer Amplitude von 1 mm sehr gut abgeschätzt werden können. Die Nachbildung des Verhaltens von QSK 3 Trägern fällt demgegenüber leicht schlechter aus. Trotzdem kann festgehalten werden, dass aufgrund der Übereinstimmung der Verformungsfigur gute Resultate erzielt werden können. Deshalb werden für sämtliche weiteren FEM-Berechnungen jeglicher Querschnittsklassen die Input-Parameter mit einer Imperfektionsform von Mode 1 und einer Amplitude von 1 mm festgelegt. Es wird angenommen, dass damit realitätsnahe Prognosen zum Verhalten der Träger auf Bauteilebene gemacht werden können.

Die wichtigsten Kennzahlen der FEM-Berechnungen, aus den beiden soeben festgelegten Input-Parametern, sind in Tabelle 4 zusammengefasst. Die Daten in dieser Tabelle können aus den jeweiligen numerischen Momenten-Rotationsgraphen gewonnen werden, wobei für die Berechnung der Werte auf das Vorgehen in Kapitel 2.1 verwiesen wird. Die Werte der maximalen Momentenwiderstände M_{peak} und der Rotationskapazitäten sind in Tabelle 4 hervorgehoben, da diese für die Vergleiche in Kapitel 5 wiederverwendet werden.

Tabelle 4: Zusammenstellung der wichtigsten Kennzahlen aus den Finite Element Berechnungen für sämtliche acht Träger

Stahlsorte	QSK 1				QSK 3			
	S355J2N	S460M	S355M	S355M_SF	S355J2N	S460M	S355M	S355M_SF
$M_{peak,FEM} [kNm]$	524	684	674	624	668	899	883	742
$\theta_{el,FEM} [^\circ]$	-	-	-	-	1.4	1.46	1.36	1.06
$\theta_{pl,FEM} [^\circ]$	1.28	1.74	1.48	1.21	-	-	-	-
$\theta_{u,FEM} [^\circ]$	11	7.5	8.25	16	11	5	6.2	18
$R_{FEM} [-]$	7.6	3.3	4.6	12.3	6.9	2.4	3.6	16

4.3 Literatur

Neben den Resultaten aus den physischen Experimenten und den virtuellen Modellen soll im Rahmen dieser Arbeit auch ein Vergleich mit der Literatur angestrebt werden. Anhand dieser Vergleichswerte soll herausgefunden werden, ob mit Hilfe von analytischen oder empirischen Formeln die wichtigsten Resultate aus den Experimenten mit ausreichender Genauigkeit abgeschätzt werden können.

Einer dieser wichtigen Kennwerte ist das maximale Moment M_{peak} . Mit den beiden Formeln 11 und 12 und den Daten aus Tabelle 2 können nach den Ansätzen von Sawyer (1961) und Lay & Galambos (1967) erste Werte abgeschätzt werden. Weiter kann nach den Erläuterungen in Kapitel 0 und Formel 1312 12ein dritter Wert für M_{peak} aus der Literatur angegeben werden.

Mit Hilfe der Grundlagen aus Kapitel 2.3 und den Werten aus Tabelle 2 ist es möglich, einen Wert für θ_u anhand der semi-empirischen Formel 9 zu berechnen. In Kombination mit den Formeln 4 bis 7 ist es anschliessend möglich, die Rotationskapazität abzuschätzen. All diese Resultate und Kennzahlen aus der Literatur sind in Tabelle 5 zusammengefasst. Dabei sind die Werte, welche in Kapitel 5 miteinander Verglichen werden, wiederum hervorgehoben. Die geschwungenen Klammern bei der Bezeichnung der M_{peak} -Werte beziehen sich auf die jeweils verwendete Formelzahl.

Tabelle 5: Zusammenstellung der wichtigsten Kennzahlen aus den Ansätzen der Literatur für sämtliche acht Träger

Stahlsorte	QSK 1				QSK 3			
	S355J2N	S460M	S355M	S355M_SF	S355J2N	S460M	S355M	S355M_SF
$M_{peak, \{11\}}$ [kNm]	577	705	664	615	789	963	907	839
$M_{peak, \{12\}}$ [kNm]	622	721	682	692	850	984	931	945
$M_{peak, \{13\}}$ [kNm]	583	773	666	635	800	1003	911	873
$\theta_{el, Lit}$ [°]	-	-	-	-	1.1	1.52	1.42	1.04
$\theta_{pl, Lit}$ [°]	1.22	1.7	1.42	1.2	-	-	-	-
$\theta_{u, Lit}$ [°]	14.67	8.92	9.93	15.6	14.35	8.76	9.73	15.24
R_{Lit} [-]	11	4.3	5.3	12	12	4.8	5.9	13.7

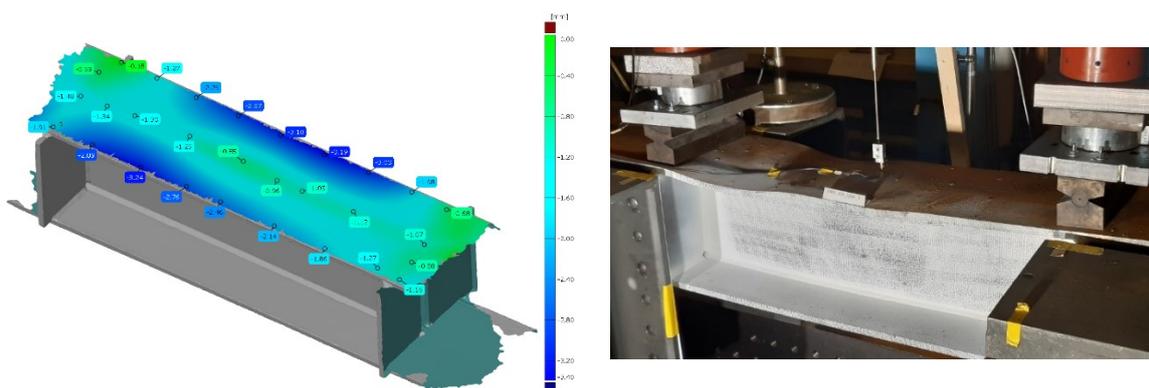
5 Diskussion

5.1 3D Scanning des Mittelfeldes

Die Abweichung der Trägergeometrie im Mittelfeld aus der Soll-Lage kann mit Hilfe des 3D Scanning quantifiziert werden. In Kapitel 4.1.1 und Anhang C sind die vertikalen Differenzen zusammengestellt. Dabei fällt auf, dass die freien Ränder der Flansche in grösserem Masse betroffen sind als die restlichen Bereiche des Trägers. Zudem weisen alle acht Träger Flanschverwölbungen auf, welche gegen das Zentrum des Trägers gerichtet sind.

Eine Erklärung für dieses Phänomen könnte die Längsschweissnaht zwischen Steg und Flansch sein. So wird beim Fertigen dieser Schweissnaht auf der Innenseite des Flansches Wärme eingebracht. Bei der anschliessenden Abkühlung dieser erhitzten Flanschbereiche kommt es wiederum zu einer Verkürzung. Da der Wärmeeintrag an der stegnahen Seite grösser ist als bei der Aussenseite des Flanschblechs, fällt die Verkürzung an der Innenseite stärker aus. Damit könnte die Verwölbung sämtlicher Flanschenden gegen das Zentrum des Trägers erklärt werden. Die Variation der Magnitude und der Verwölbung entlang der Längsachse könnte folglich auf Abläufe bei der Erstellung der Schweissnaht (wie beispielsweise die Geschwindigkeit beim Schweiessen oder das An- und Absetzen des Schweissgerätes) zurückgeführt werden.

Eine der Erkenntnisse aus Kapitel 4.2.1 ist, dass die angesetzte Amplitude der Imperfektion für die FEM-Modellierung nur von untergeordneter Bedeutung ist. Demzufolge ist es nicht erforderlich, die genauen Werte der gescannten Imperfektionen für die numerische Modellierung anzusetzen. Die Verteilung der effektiv gescannten Imperfektionen kann jedoch teils qualitativ genutzt werden, um das Auftreten der ersten lokalen Beulhalbwelle zu validieren. In Figur 44 ist dies am Beispiel des S355J2N_QSK_3 Trägers dargestellt. Im linken Bild ist zu sehen, dass eine grosse Abweichung aus der Soll-Lage im zugewandten freien Ende des Flansches bei der linken Hydraulikpresse vorhanden ist. Das Bild rechts zeigt diesen Träger in einem frühen Stadium des Versuchs. Dort ist zu sehen, dass sich die Ausbildung einer ersten lokalen Instabilität genau dort bildet, wo die grossen Imperfektionen von Bild links aufgenommen wurden. Somit ist zu vermuten, dass die Imperfektion eine leichte Schwächung des Profils darstellte und sich deshalb während des Versuchs an dieser Stelle die ersten initialen Deformationen ausbildeten.

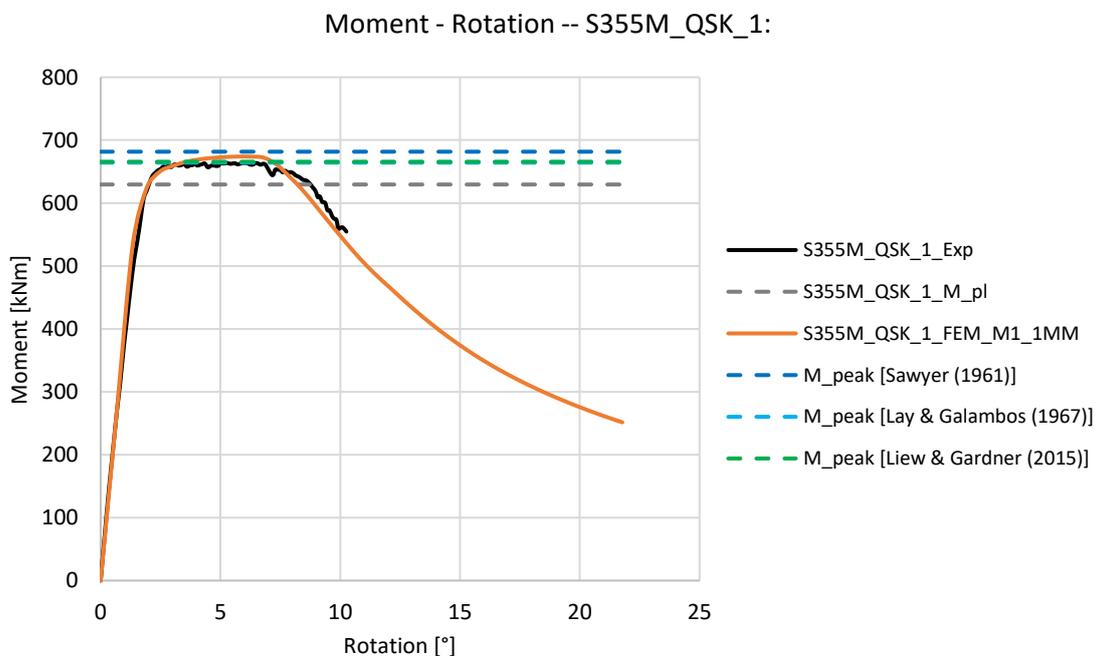


Figur 44: Vergleich der gescannten Imperfektionen mit dem Verformungsbild der ersten lokal auftretenden Beulhalbwelle am Beispiel des S355J2N_QSK_3 Trägers

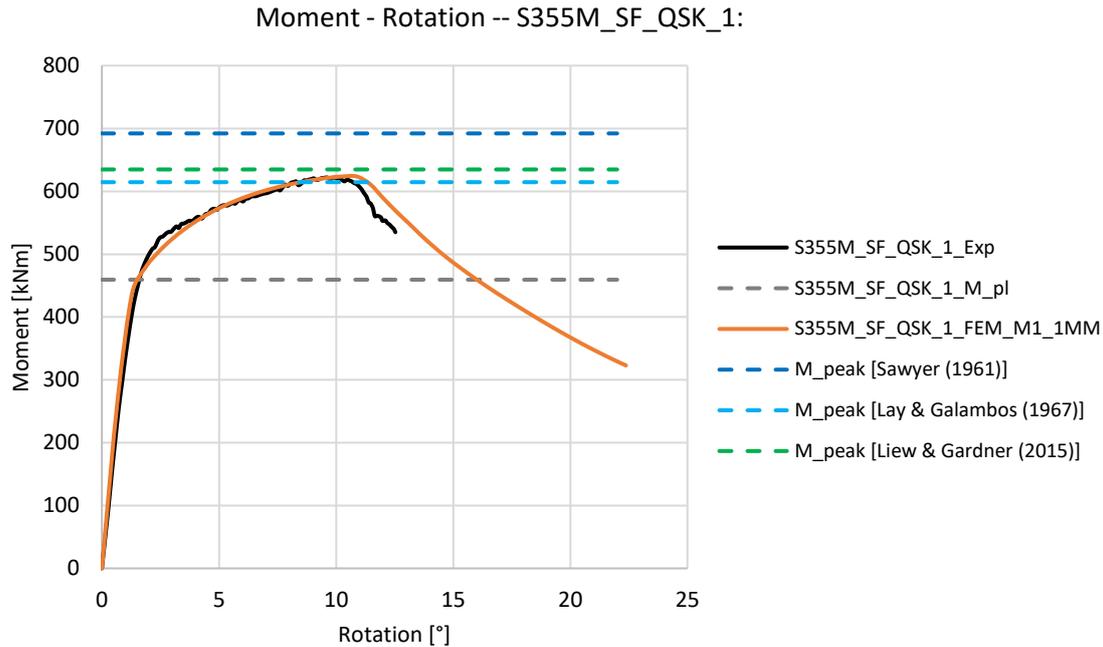
5.2 Momenten-Rotationsverhalten

Nun können die wichtigsten Resultate aus den physischen Experimenten, den numerischen Modellen und den Daten aus der Literatur zusammengeführt werden. Die drei Herangehensweisen werden in den folgenden Figuren miteinander verglichen. Die Figuren 45 und 46 zeigen die Gegenüberstellungen der QSK 1 Träger am Beispiel des S355M und des S355M_SF, wobei die Resultate aus den Stahlsorten S355J2N und S460M in Anhang H zu finden sind. Aus den Resultaten dieser acht Graphiken können folgende Punkte vermerkt werden:

- Die Übereinstimmung des Momenten-Rotationsverlaufs aus dem Experiment und dem FEM-Modell ist sehr hoch. Die Steigung im Anfangsbereich, das abflachende Verhalten nach Erreichen von M_{pl} , sowie die Neigung des abfallenden Verlaufs kann für sämtliche vier Träger mit einer sehr hohen Genauigkeit anhand des FEM-Modells reproduziert werden.
- Die Extrapolation der Experimentverläufe kann dank dieser sehr guten Übereinstimmung anhand des FEM-Modells erfolgen. Dadurch wird es möglich, auch für den neuen S355M_SF_QSK_1 Träger einen Wert für die Rotationskapazität abzuschätzen.
- Die QSK 1 Träger aus den herkömmlichen Stahlsorte überschreiten nur leicht den Wert von M_{pl} und können diesen Momentenwiderstand über gewisse Rotationen aufrechterhalten. Demgegenüber ist in Figur 46 deutlich zu sehen, dass der QSK 1 Träger aus dem neuen Slimfit-Stahl den plastischen Biege widerstand weit übertrifft.
- Der maximale Momentenwiderstand kann durch das FEM-Modell dank der sehr guten Übereinstimmung mit den experimentellen Werten nahezu exakt erfasst werden.
- Alle drei Formeln für M_{peak} aus der Literatur liefern für die Träger S355M_QSK_1 und S460M_QSK_1 sehr gute Ergebnisse. Für den S355M_SF_QSK_1 liefern die Formeln von Lay & Galambos (1967) und Bartsch et al. (2015) ebenfalls sehr gute Resultate. Hingegen wird der M_{peak} -Wert beim S355J2N_QSK_1 mit sämtlichen Literaturformeln zu hoch abgeschätzt.



Figur 45: Gegenüberstellung des Momenten-Rotationsverhaltens aus dem Experiment, dem FEM-Modell und den Kennwerten aus der Literatur des S355M_QSK_1 Trägers



Figur 46: Gegenüberstellung des Momenten-Rotationsverhaltens aus dem Experiment, dem FEM-Modell und den Kennwerten aus der Literatur des S355M_SF_QSK_1 Trägers

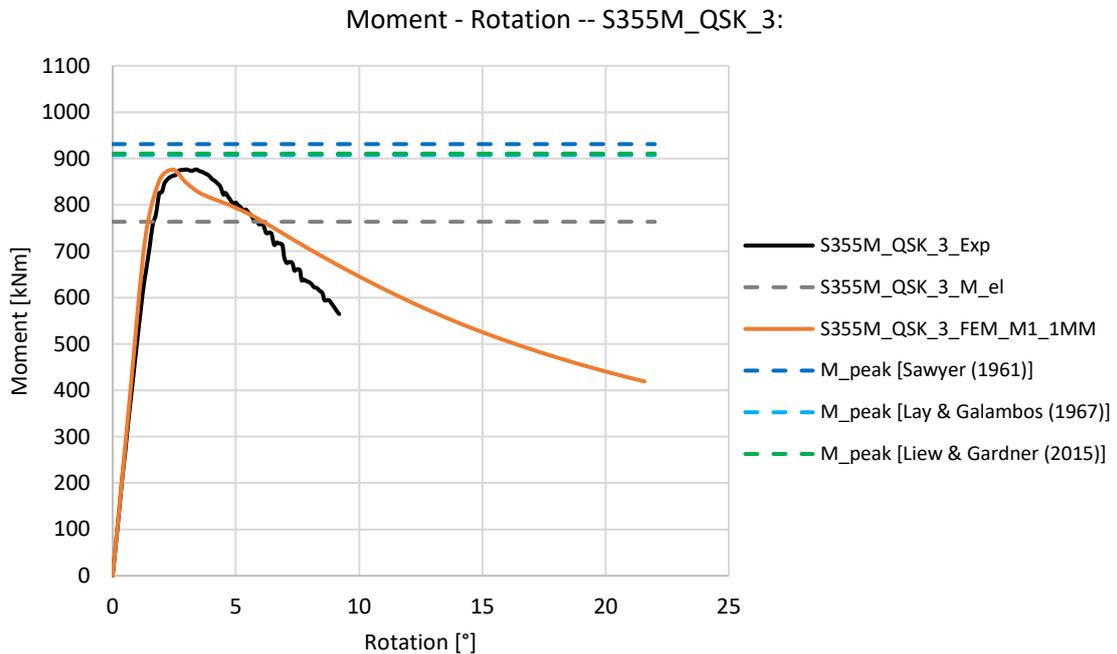
Die Gegenüberstellung von Experiment, FEM-Modell und Abschätzformeln aus der Literatur für die Träger der QSK 3 sind in Figur 47 und Figur 48 gezeigt, wobei die Resultate für den S355J2N und S460M wiederum in Anhang H zu finden sind.

Wie gut die Übereinstimmungen des Momenten-Rotationsverhaltens zwischen den Experimentdaten und numerischen Berechnungen ausfallen, sind für die vier Träger der QSK 3 Reihe teils unterschiedlich. Die initiale Steigung und das maximale Moment kann beim S355M_QSK_3 Träger (Figur 47) und beim S460M Träger anhand des FEM-Modells gut abgeschätzt werden. Jedoch kommt es zu einer Differenz bei der Neigung der abfallenden Kurven. Diese Abweichung könnte durch das asymmetrische Verhalten dieser beiden Versuchsträger begründet sein (siehe Figur 41). Infolge dieser asymmetrischen Deformation könnte es zu einer Konzentration der Kräfte über einen kleineren Bereich des Trägers kommen. In Kombination mit dem nur wenig verfestigenden Verhaltens dieser beiden Stahlsorten ist es möglich, dass der Momentwiderstand schneller abfällt, als wenn sich das gesamte Mittelfeld gleichmässig plastifizieren müsste. Im FEM-Modell wird von dieser Annahme ausgegangen, wodurch ein flacherer Abfall in der Numerik resultiert. Der maximale Momentenwiderstand dieser beiden Träger kann mit sämtlichen drei Literaturformeln mit einer guten Annäherung abgeschätzt werden.

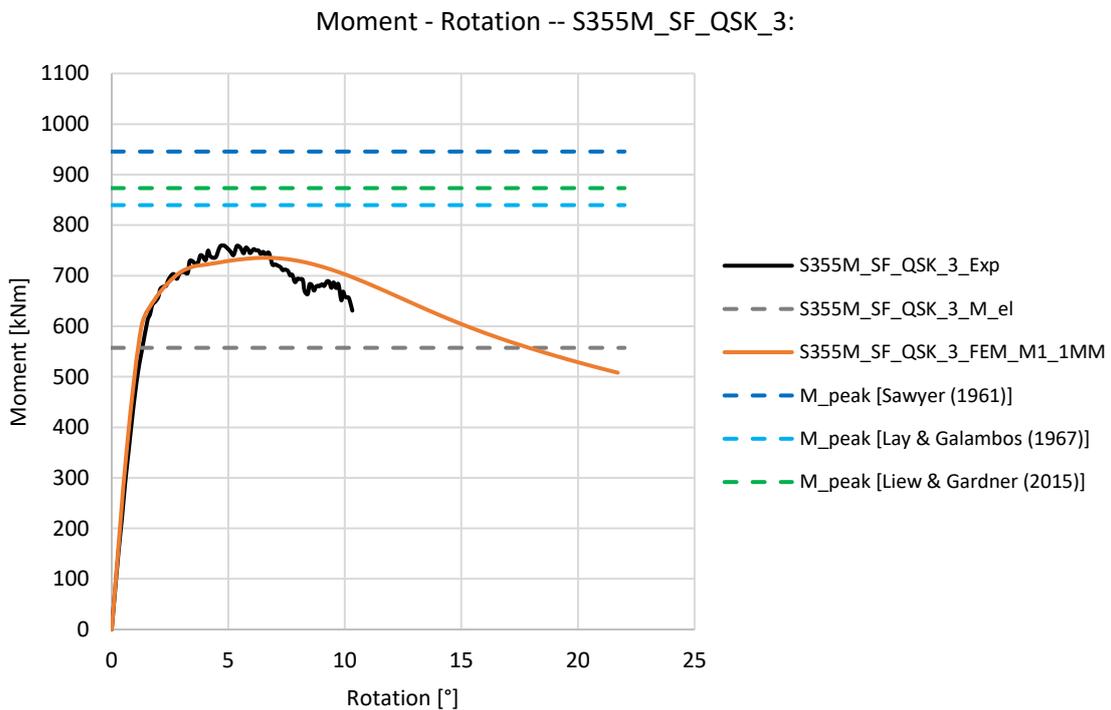
Das Verhalten des S355J2N_QSK_3 Trägers (vgl. Anhang H) fällt insofern auf, als dass der Wert für M_{peak} aus dem FEM-Modell zu hoch vorausgesagt wird. Zudem wird ein flacherer Abfall der Momenten-Rotationsbeziehung angenommen, was zu einem erhöhten Wert der numerisch berechneten Rotationskapazität führt.

Die Numerik erlaubt hingegen beim S355M_SF_QSK_3 Träger eine gute Approximation des Momenten-Rotationsverhaltens, welches in Figur 48 dargestellt ist. Es wird angenommen, dass dank der guten Übereinstimmung die Extrapolation des Versuchs mit Hilfe der Numerik zulässig ist. Somit kann ein Wert für die Rotationskapazität auf Bauteilebene anhand des validierten FEM-Modells abgeschätzt werden. Diese Annahme wird dadurch gestützt, dass die Verformungsfigur des Trägers realitätsgetreu nachgebildet werden kann (vgl. Figur 43). In Figur 48 ist zudem zu erkennen, dass der Träger aus dem neuen Slimfit-Träger M_{el} weit überschreitet. M_{peak} kann nur durch das FEM-Modell

gut bestätigt werden. Alle drei Formeln aus der Literatur überschätzen die maximale Momentenkapazität dieses Trägers hingegen stark.



Figur 47: Gegenüberstellung des Momenten-Rotationsverhaltens aus dem Experiment, dem FEM-Modell und den Kennwerten aus der Literatur des S355M_QSK_3 Trägers



Figur 48: Gegenüberstellung des Momenten-Rotationsverhaltens aus dem Experiment, dem FEM-Modell und den Kennwerten aus der Literatur des S355M_SF_QSK_3 Trägers

Die bessere Übereinstimmung im Momenten-Rotationsverhalten bei den QSK 1 Trägern kann damit begründet werden, dass die lokalen Instabilitäten und Beulerscheinungen deutlich weniger stark auftraten als bei den QSK 3 Trägern. Da diese für das FEM-Modell schwieriger zu reproduzieren sind, kommt es deshalb zu leicht schlechteren Resultaten bei den «beulanfälligeren» QSK 3 Trägern.

Die wichtigsten Kennzahlen und Resultate aus den Experimenten, den FEM-Modellierungen und den Literaturvergleichen können in tabellarischer Form zusammengefasst werden und sind in Tabelle 6 dargestellt. Dabei stellen die grau hinterlegten Daten jene Werte dar, welche als «reale» Resultate einzustufen sind. Diese sind, abgesehen von der Rotationskapazität der Slimfit-Träger, immer jene aus den physischen Experimenten. Wie zuvor erwähnt, wird aber dank der guten bis sehr guten FEM-Übereinstimmung angenommen, dass diese die Realität korrekt abbilden. Die Werte in Klammern zeigen sodann die prozentuale Abweichung des jeweiligen Wertes aus der Numerik oder Literatur im Vergleich zum «realen» Vergleichswert.

Generell kann in Tabelle 6 festgehalten werden, dass die Rotationskapazitäten von QSK 1 Trägern höher sind jene von QSK 3 Trägern. Zudem erreichen die Stahlsorten S355M und S460M die tieferen R-Werte. Wobei diese teils um den Grenzwert von 3 liegen, welcher für die QSK 1 gemäss Norm gefordert sind. Der höhere R-Wert der S355J2N-Träger der QSK 1 und 3 kann im Zusammenhang mit dem Vorhandensein des Fließplateaus stehen. Unbestritten ist, dass die Träger aus dem neuen Slimfit-Stahl für die Werte der Rotationskapazität in neue Bereiche vorstossen. Denn diese erreichen Werte von 12.3 bzw. 16. Eine Erklärung dafür könnte die tiefe Fließspannung und das stark ausgeprägte verfestigende Verhalten sein. Denn einerseits fallen die Werte von M_{el} bzw. M_{pl} sehr tief aus und andererseits dauert es aufgrund der Verfestigung sehr lange bis der Momentwiderstand wieder auf diesen Wert absinkt.

In Tabelle 6 ist ersichtlich, dass die Abweichungen der Rotationskapazitäten der QSK 1 Träger aus den FEM-Modellen im einstelligen Prozentbereich liegt. Bei den QSK 3 Trägern liegt diese Differenz hingegen zum Teil höher. Die Übereinstimmung ist davon abhängig, wie gut das Momenten-Rotationsverhalten im Modell getroffen wird. Die Abschätzungen für den R-Wert aus der Literatur kommen dabei teilweise sehr nahe an den tatsächlichen Wert heran, jedoch gibt es bereits bei den QSK 1 Trägern Differenzen um 30 %. Diese Abweichungen können für die Träger der QSK 3 Reihe noch grösser ausfallen. Ein möglicher Grund für diese teils grossen Differenzen könnte darin liegen, dass die Kalibrierung dieser semi-empirischen Formeln zu grossen Teilen an hochfesten Stahlsorten der Güteklasse S690 erfolgte. Daraus ergaben sich für die beiden Faktoren $\Delta\sigma$ und k_{fy} möglicherweise Werte, welche für die hier verwendeten Stahlsorte nicht zutreffend sind.

Tabelle 6: Zusammenstellung der wichtigen Kennzahlen und Resultate aus den physischen Experimenten, numerischen Modellen und den Daten aus der Literatur für sämtliche acht Träger

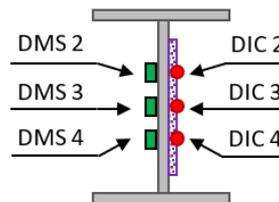
	QSK 1				QSK 3			
	S355J2N	S460M	S355M	S355M_SF	S355J2N	S460M	S355M	S355M_SF
R_{Exp} [-]	7.18	3	4.9	N/A	4.7	2.9	3.3	N/A
R_{FEM} [-]	7.6 (5%)	3.3 (9%)	4.6 (-7%)	12.3	6.9 (32%)	2.4 (-21%)	3.6 (8%)	16.0
R_{Lit} [-]	11 (35%)	4.3 (30%)	5.3 (8%)	12 (-3%)	12 (61%)	4.8 (40%)	5.9 (44%)	13.7 (-17%)
$M_{peak,Exp}$ [kNm]	520	685	663	622	627	943	877	760
$M_{peak,FEM}$ [kNm]	524 (1%)	684 (0%)	674 (2%)	624 (0%)	668 (6%)	899 (-5%)	883 (1%)	742 (-2%)
$M_{peak,\{11\}}$ [kNm]	577 (10%)	705 (3%)	664 (0%)	615 (-1%)	789 (21%)	963 (2%)	907 (3%)	839 (9%)
$M_{peak,\{12\}}$ [kNm]	622 (16%)	721 (5%)	682 (3%)	692 (10%)	850 (26%)	984 (4%)	931 (6%)	945 (20%)
$M_{peak,\{13\}}$ [kNm]	583 (11%)	773 (11%)	666 (0%)	635 (2%)	800 (22%)	1003 (6%)	911 (4%)	873 (13%)

Aus Tabelle 6 können die Prozentabweichungen der M_{peak} -Werte zwischen Experiment und Numerik herausgelesen werden. Die Ergebnisse zeigen, dass teils eine perfekte Übereinstimmung erzielt werden kann. Dies ist auf die sehr guten bzw. gute Reproduktion des Momenten-Rotationsverhaltens für QSK 1 bzw. QSK 3 Träger zurückzuführen.

Unabhängig von der Profilgeometrie kann der Wert für M_{peak} der Stahlsorten S355M und S460M gut anhand der Formeln aus der Literatur abgeschätzt werden. Abgesehen vom S355M_SF_QSK_1 Träger überschätzen jedoch alle drei Formeln die maximale Momentenkapazität der weiteren drei Träger (S355J2N_QSK_1, S355J2N_QSK_3 und S355M_SF_QSK_3). Es ist zudem nicht direkt ersichtlich, dass die detailliertere Formel von Liew & Gardner (2015) einen Mehrwert gegenüber den einfacheren Formeln von Sawyer (1961) und Lay & Galambos (1967) generiert.

5.3 Vergleich der Dehnungen aus DMS und DIC

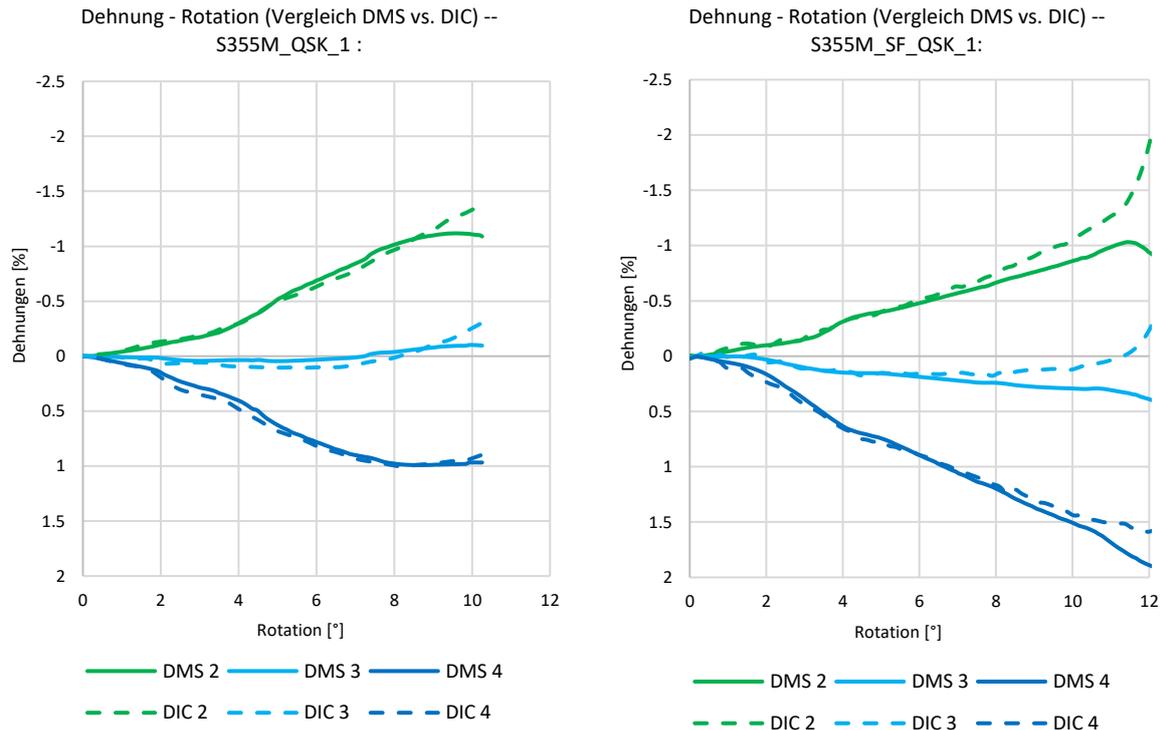
Ein weiterer Bestandteil dieser Arbeit stellt die Gegenüberstellung der beiden Messmethoden DMS und DIC im Experiment dar. Dabei werden Dehnungsmesspunkte definiert, welche für beide Messprinzipien auf derselben Höhe im Steg des Trägers liegen. Diese jeweiligen Punkte sollten somit theoretisch dieselben Dehnungen zeigen. Dies ist in Figur 49 am Querschnitt eines QSK 1 Trägers illustriert. Beim DIC können dazu die passenden Punkte im Specklefeld definiert und ausgewertet werden, welche mit DIC 2, DIC 3 und DIC 4 bezeichnet werden. Diese Messpunkte stellen das Pendant zu den Punkten DMS 2, DMS 3 und DMS 4 dar.



Figur 49: Illustration der Messanordnung für den Vergleich zwischen den drei DMS Dehnungsmesspunkten (DMS 2, 3 und 4) gegenüber den korrespondierenden drei DIC-Dehnungsmesspunkte (DIC 2, 3 und 4)

Der Dehnungsverlauf dieser sechs Messpunkte über den Versuch, sprich der zurückgelegten Rotation, wird in Figur 50 analog zu den Figuren 24 und 28 dargestellt. Die Diskussion wird durch die Daten der beiden Träger S355M_QSK_1 und S355M_SF_QSK_1 verdeutlicht, welche in Figur 50 gezeigt sind.

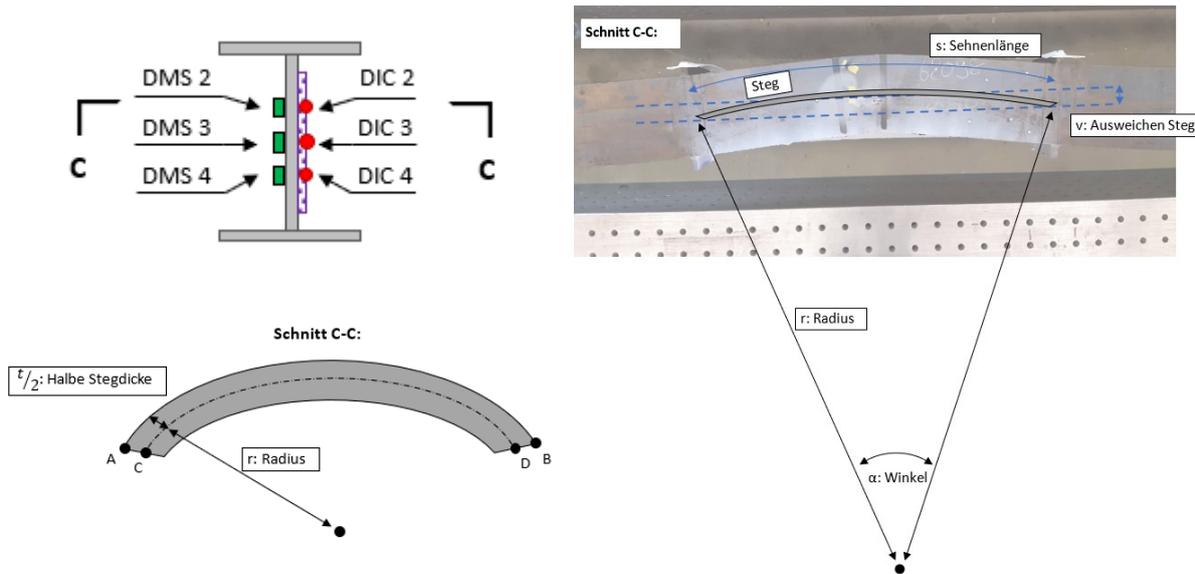
Generell ist eine gute Übereinstimmung der beiden Dehnungsmessmethoden zu erkennen. So zeigen beide Diagramme einen ähnlichen fächerförmigen Verlauf der Dehnungen über die Rotation im Versuch. In der rechten Graphik von Figur 50 ist zu sehen, dass die gemessenen DIC Dehnungen leicht negativer ausfallen als jene der DMS Messpunkte. Das umgekehrte Verhalten kann beim S355M_QSK_1 Träger (linkes Diagramm) zwischen einer Rotation von 3° bis 8° beobachtet werden. Dort weisen die DMS Dehnungen leicht negativere Werte auf.



Figur 50: Direkte Gegenüberstellung der sechs Dehnungen aus DMS 2, DMS 3 und DMS 4 gegenüber von DIC 2, DIC 3 und DIC 4 über die zurückgelegte Rotation am S355M_QSK_1 (links) und S355M_SF_QSK_1 (rechts)

Eine qualitative Erklärung dieser Differenzen kann mit der Verformung des Stegs vorgenommen werden. Wie in Figur 17 ersichtlich, verkippen sich der Oberflansche und der Steg der beiden Träger aus der initialen Lage. So weicht der S355M_QSK_1 Träger nach vorne aus, wodurch sich der Steg aus der vertikalen Ebene verbiegt. Dadurch werden zusätzliche Dehnungen infolge der Verformung um die schwache Achse induziert. Dies würde zu einer zusätzlichen Dehnung der zugewandten DIC Messpunkte und einer Stauchung der abgewandten DMS Punkte führen. Der S355M_SF_QSK_1 zeigte eine Verkipfung nach hinten, wodurch die Dehnungsmesswerte von DIC und DMS direkt in umgekehrter Weise beeinflusst werden.

Bei den obigen Ausführungen handelt es sich jedoch lediglich um eine Theorie, welche eine qualitative Erklärung ermöglicht. Anhand eines einfachen Modells, welches die zusätzliche Dehnung im Steg infolge Biegung um die schwache Achse untersucht, soll eine quantitative Validierung dieser These erfolgen. Das anschliessend vorgestellte Modell wird als «Stegverwölbungstheorie» bezeichnet und ist in Figur 51 mittels schematischer Darstellungen illustriert. Dabei wird ein horizontaler Schnitt durch den Steg des Trägers angenommen. Die Verwölbung des Stegblechs aus der vertikalen Ebene wird als Sektor eines Kreises mit einheitlichem Radius r angenommen. Dieser Kreissektor mit Winkel α wird durch die beiden eingeschweissten Rippen begrenzt. Somit hat die Sehnenlänge s die gleiche Länge von 1 m wie das Mittelfeld des Trägers. Als letzter Einflussfaktor für dieses Modell ist die horizontale Verschiebung des Stegs aus der vertikalen Anfangsebene nötig (dargestellt im rechten Bild von Figur 51, wobei dieser Wert des Ausweichens mit dem Buchstaben v abgekürzt wird). Das Ausmass dieser Verformung des Stegs aus der Ebene kann mit Hilfe der DIC Daten quantitativ im Experiment ermittelt werden, wie beispielhaft in Figur 33 gezeigt ist.



Figur 51: Illustrationen der Stegverwölbungstheorie am Beispiel des S355M_SF_QSK_1 dargestellt mit den dazu nötigen Parametern s , v , r und α

Anhand dieser beiden bekannten Parametern s und v aus den Daten und den geometrischen Beziehungen von Formeln 14 und 15 können die Werte für r und α berechnet werden.

$$v = r \left(1 - \cos\left(\frac{\alpha}{2}\right) \right) \tag{14}$$

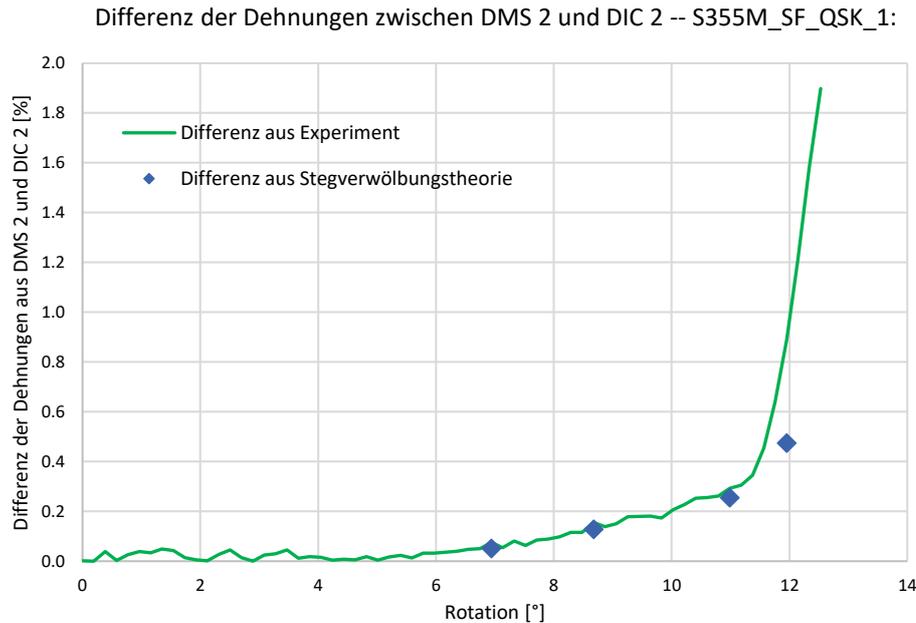
$$s = r \cdot \alpha = 1000 \text{ mm} \tag{15}$$

Die zusätzlichen Dehnungen des Stegs infolge der Verwölbung aus der Ebene kann mit der Formel 16 beschrieben werden. Diese beruht auf geometrischen Zusammenhängen und kann mit Hilfe des linken unteren Schemas von Figur 51 hergeleitet werden. Der Verkürzung der einen Seite und der Verlängerung der anderen wird mit dem vorangestellten Faktor 2 in Formel 16 Rechnung getragen.

$$\epsilon_{\text{Zusätzlich}} = 2 \cdot \frac{\Delta L}{L} = 2 \cdot \frac{\overline{AB} - \overline{CD}}{\overline{CD}} = 2 \cdot \frac{(r + t/2) \cdot \alpha - r \cdot \alpha}{r \cdot \alpha} = \frac{t}{r} \tag{16}$$

Die Resultate dieser Hypothese sind in der folgenden Graphik von Figur 52 gezeigt. Dabei stellt die grüne Linie die Differenz der Dehnungen aus DMS 2 und DIC 2 des S355M_SF_QSK_1 Trägers dar. Die blauen Punkte zeigen die zusätzlichen Dehnungen $\epsilon_{\text{Zusätzlich}}$, welche durch die Verwölbung des Stegs unter der Verwendung des soeben vorgestellten Modells zu erwarten sind. Mit diesem Diagramm kann bestätigt werden, dass die Messabweichungen von DMS und DIC auf das Verkippen des Stegs aus der Ebene zurückzuführen sind. Im Bereich von 5° bis 11° können die Dehnungsdifferenzen aus den beiden Dehnungsmessmethoden mit Hilfe des Modells sehr gut begründet werden. Die Differenz zwischen Modell und Experiment bei Rotation grösser 11° kann durch Probleme bei der DIC Auswertung erklärt werden.

Im Rahmen dieser Arbeit kann somit bestätigt werden, dass die Dehnungsmessungen mit DMS und DIC zu äquivalenten Resultaten führen.



Figur 52: Vergleich der Dehnungsdifferenzen von DMS 2 und DIC 2 des S355M_SF_QSK_1 aus dem Experiment und den Differenzen, welche aus der Stegverwölbungstheorie zu erwarten sind

5.4 Untersuchung der Querschnittsklassifizierung

Inwieweit das Verhalten der Experimentträger mit jenem aus der Theorievorstellung nach Norm übereinstimmt, soll ebenfalls evaluiert werden. Dabei wird das Momenten-Rotationsverhalten aus der Theorie nach Figur 5 mit den effektiv angetroffenen Verläufen der Versuche aus Figur 22 verglichen. Die wichtigsten Feststellungen werden in den folgenden Punkten zusammengefasst.

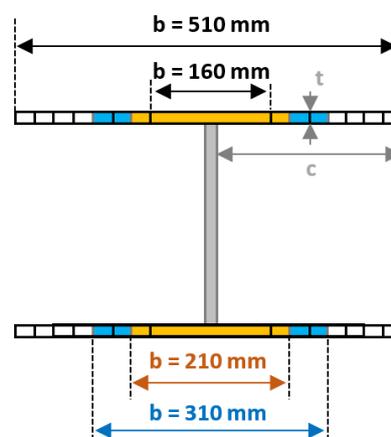
- Nach Interpretation der Normen erreichen QSK 1 Träger M_{pl} und können dieses Moment über eine gewisse Rotation halten. Dieses Verhalten wird von allen vier Trägern der QSK 1 Reihe im physischen Versuch bestätigt.
- Die herkömmlichen drei Stahlsorten mit QSK 1 Geometrie zeigen keine bedeutenden Steigerungen des Widerstandsmoment über M_{pl} . Der massiv höhere Verlauf des S355M_SF_QSK_1 Trägers kann mit dem ausgeprägten verfestigenden Verhalten des Materials begründet werden.
- Gemäss Theorie müssten sämtliche Träger der QSK 3 Versuchsreihe ihr M_{el} erreichen und im Anschluss einen schnellen Abfall des Biege­widerstandes zeigen. Lediglich der S355J2N der QSK 3 erreicht nur den Wert von M_{el} . Entgegen der Theorie kann dieser Träger das elastische Widerstandsmoment über grosse Rotationen aufrechterhalten. Dies kann durch das Vorhandensein des Fließplateaus auf materialtechnischer Ebene begründet werden.
- Die QSK 3 Träger aus S355M und S460M erreichen wiederum Biege­widerstände im Bereich von M_{pl} . Der anschliessende schnelle Abfall im Momenten-Rotationsdiagramm entspricht nach Norm mehr einem Träger der QSK 2.
- Der S355M_SF mit einer Profilgeometrie, welche nach Norm der QSK 3 zugeteilt wird, zeigt ein wesentlich anderes Verhalten als nach dem Modell in Figur 5 zu erwarten wäre. So übersteigt er M_{el} um knapp 40 % und kann über grosse Rotationen im Versuch diese Momenten­widerstände halten. Eine mögliche Erklärung kann wiederum im verfestigenden Materialverhalten des neuartigen Slimfit-Stahls gefunden werden.

Besonders die Träger mit QSK 3 zeigen ein deutlich besseres Verhalten im Momenten-Rotationsdiagramm als in der Theorie nach Figur 5 zu erwartet wäre. Eine Erklärung könnte in der Definition der Norm liegen. Bei den untersuchten Blechen für die Querschnittsklassifizierung wird

angenommen, dass die angrenzenden Bleche eine gelenkige Lagerung des betrachteten Blechstücks darstellen. Wenn die angrenzenden Bleche jedoch sehr massiv ausfallen, haben diese eine günstige Wirkung auf das untersuchte Blech. Sprich, die angrenzenden Bleche können eine teilweise Einspannung generieren. Da die QSK 3 Profile mit 310 mm im Vergleich zur Höhe von 300 mm eine grössere Breite aufweisen, kann argumentiert werden, dass der Steg eine günstige Wirkung auf den massgebenden Druckflansch ausübt. Als Folge dieser günstigen «Stützung» des Flansches durch den Steg könnte sich das Verhalten des Trägers dem Verhalten eines günstigeren QSK 2 Träger annähern. Damit kann erklärt werden, weshalb die Träger S355M_QSK_3 und S460M_QSK_3 ein Momenten-Rotationsverhalten zeigen, welches eher einem QSK 2 Träger zuzuordnen wäre. Da die Norm jedoch keine Berücksichtigung dieser teilweisen Einspannwirkung von angrenzenden Blechen zulässt, fällt die Querschnittsklassifizierung stark auf der konservativen Seite aus. Dies mag dazu führen, dass die gebauten Strukturen auf der sicheren Seite liegen. Jedoch bedeutet dies auch, dass mehr Material eingesetzt wird, als tatsächlich nötig wäre.

Aus den genannten Punkten geht ausserdem hervor, dass die Querschnittsklassifizierung der heutigen Normen das Verhalten des neuen Slimfit-Stahls nicht gut abbildet. Den Trägern dieser Stahlorte werden massiv schlechtere Momenten-Rotationsverhalten zugeschrieben, als sie in Realität zeigen. Da dies zu einer ineffizienten Nutzung des begrenzten Rohstoffs Stahl und einem unwirtschaftlichen Einsatz im Bausektor führt, sollen im Folgenden weitere Untersuchungen zur Querschnittsklassifizierung vorgenommen werden.

Bei diesen weiteren Nachforschungen wird untersucht, wie sich das Momenten-Rotationsverhalten von virtuellen Trägern verhält, wenn die QSK des Profils variiert wird. Das untersuchte System entspricht weiterhin dem 4-Punkt Biegeversuch und die numerische Modellierung erfolgt mit Hilfe des erfolgreich kalibrierten FEM-Modells. Um Träger mit anderen Querschnittsklassen zu erhalten, wird die Breite des Flansches variiert. Die Flanschbreite wird in Schritten von 50 mm vergrössert, wobei in der Parameterstudie die Flanschbreite b von 160 mm bis 510 mm reicht. Alle anderen Geometrien der Träger bleiben identisch. Dabei entspricht der Träger mit Flanschbreite von 160 mm der QSK 1 und jener mit 510 mm Breite der QSK 4, wodurch das ganze Spektrum an Querschnittsklassen nach Norm abgedeckt ist. Diese Parameterstudie ist in Figur 53 schematisch skizziert. Darin wird ebenfalls gezeigt, dass die Träger mit 210 mm und 310 mm Flanschbreite durch die Versuche bereits modelliert und verifiziert wurden. Zusätzlich ist in diesem Bild der Wert des massgebenden (c/t) -Verhältnisses des Flansches für die Querschnittsklassifizierung verdeutlicht.



Figur 53: Schematische Darstellung der Variation der Flanschbreite b von 160 mm bis 510 mm in 50 mm Schritten, wobei die Träger mit 210 mm und 310 mm bereits modelliert und mit physischen Experimenten verifiziert wurden

Die Untersuchungen beschränken sich auf die beiden Stahlsorten S355M und S355M_SF. Als Erstes wird die herkömmliche Stahlsorte S355M untersucht, um herauszufinden, ob das Momenten-

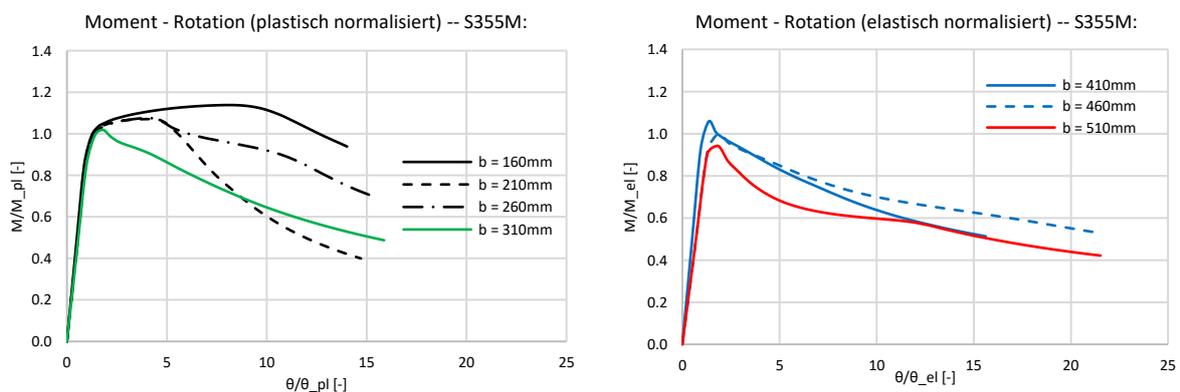
Rotationsverhalten dieser unterschiedlichen Querschnittsklassen nach der heutigen Norm zutreffend beschrieben wird. Bei der erneuten Modellierung derselben Trägergeometrien werden jedoch als Materialkennwerte die neuartigen Spannungs-Dehnungsbeziehungen des Slimfit-Stahls angesetzt. Die Darstellung der Momenten-Rotationsverhalten erfolgt anhand von normalisierten Achsen, um besser darstellen zu können, ob die Verläufe die jeweiligen Werte von M_{el} oder M_{pl} erreichen.

Es folgt die Auswertung des effektiven Momenten-Rotationsverhaltens der jeweiligen Träger, wobei in Figur 54 die Resultate für den S355M-Stahl und in Figur 55 jene für den S355M_SF-Stahl gezeigt werden.

Das Momenten-Rotationsverhalten der numerisch modellierten Träger mit Flanscbreiten von 160 mm bis 510 mm aus S355M-Stahl sind in Figur 54 gezeigt. In der linken Graphik ist erkennbar, dass sich die Träger mit Flanscbreiten von 160 mm bis 260 mm ähnlich verhalten. Denn diese erreichen M_{pl} und können diesen Momentenwiderstand über eine gewisse Rotation halten. Somit kann diesen drei Trägern aufgrund ihres effektiven Momenten-Rotationsverhaltens die QSK 1 zugeordnet werden und sind im Diagramm mit schwarzer Farbe gekennzeichnet. Der Momentenwiderstand des Trägers mit einer Flanscbreite von 310 mm, fällt jedoch nach M_{pl} schnell ab. Dieses effektive Momenten-Rotationsverhalten entspricht einem QSK 2 Träger, weshalb dieser grün gekennzeichnet wird.

Die Darstellung der Momenten-Rotationsbeziehung der Träger mit 410 mm und 460 mm Breite werden im rechten Diagramm von Figur 54 gezeigt. Diese beiden Träger erreichen lediglich das elastische Widerstandsmoment M_{el} und fallen im Anschluss schnell wieder ab. Somit wird diesen beiden Trägern die tatsächliche QSK 3 zugeordnet und sind blau eingefärbt. Der Träger mit Flanscbreite 510 mm ist der einzige, welcher M_{el} nicht erreicht. Dieses Momenten-Rotationsverhalten entspricht einem Träger der QSK 4 und wird rot dargestellt. Es muss angemerkt werden, dass der virtuelle Träger mit Flanscbreite von 360 mm wegen numerischer Probleme aus der Auswertung ausgeschlossen wird.

Aus den Untersuchungen an den Trägern mit handelsüblichem S355M geht somit hervor, dass die jeweiligen Träger in der Tat ein ähnliches Momenten-Rotationsverhalten zeigen, welches nach Norm angenommen wird (vgl. Figur 5). Wie der Vergleich zwischen zugeordneter QSK nach Norm und derjenigen QSK aus dem effektiven Momenten-Rotationsverhalten ausfällt, ist in Tabelle 7 dargestellt. Deren Auswertung und Diskussion erfolgt nach dem Vorstellen der Resultate der S355M_SF Träger.



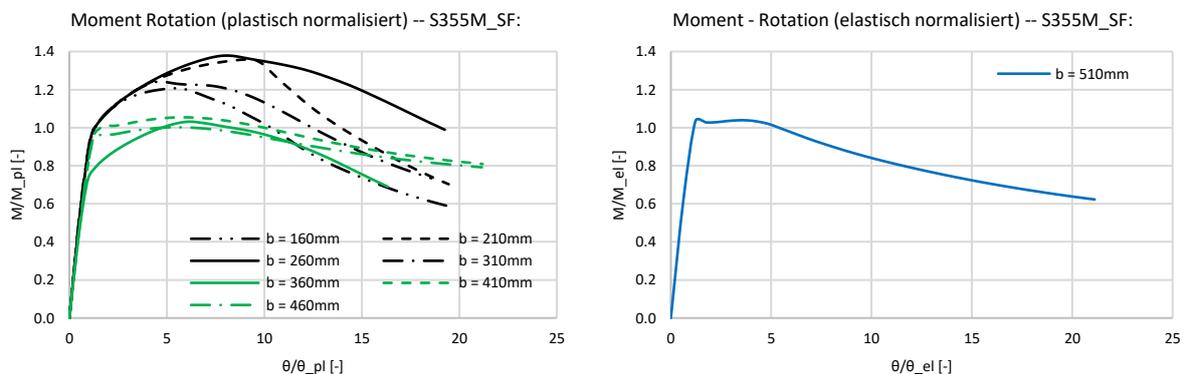
Figur 54: Momenten-Rotationsverhalten bei der Variation der Flanscbreite b von 160 mm bis 510 mm an Trägern aus der herkömmlichen Stahlart S355M

In Figur 55 sind die Momenten-Rotationsverhalten der virtuellen Träger aus S355M_SF dargestellt. Bei diesen gezeigten Resultaten können im weitesten Sinne drei unterschiedliche Scharen von Kurven definiert werden, welche sich voneinander unterscheiden. Die Träger mit Flanscbreiten von 160 mm bis 310 mm bilden dabei die erste Gruppe, welche sich durch einen massiv höheren Biege

als M_{pl} auszeichnen. Dieser wird um 20 % bis 40 % übertroffen und fällt erst bei grossen Rotationen wieder unter M_{pl} . Diese Schar 1 wird in der linken Graphik von Figur 55 schwarz eingefärbt. Ein leicht anderes Verhalten zeigen die grün hervorgehobenen Kurven, welche die Träger mit Breiten von 360 bis 460 mm darstellen und als Schar 2 bezeichnet werden. Diese erreichen M_{pl} und können diesen Wert über grosse Rotationen aufrechterhalten. Lediglich der Träger mit einer Flanschbreite von 510 mm aus S355M_SF-Stahl erreicht lediglich den elastischen Biege widerstand und ist als einziger in der rechten Graphik dargestellt. Da sich das Momenten-Rotationsverhalten dieses Trägers stark von den anderen unterscheidet, wird dieser der Schar 3 zugeteilt und blau gekennzeichnet.

Der Grund, dass für die Slimfit-Träger die Gruppen von Kurven als Scharen bezeichnet werden, liegt darin, dass sich diese nicht direkt in das Verhaltenskonzept der Norm eingliedern lassen. Denn nach den Momenten-Rotationsvorstellungen der Norm würden sämtliche Träger von Schar 1 und 2 der QSK 1 entsprechen. Der Träger mit 510 mm Breite, welcher der Schar 3 zugeordnet ist, unterscheidet sich insofern von der QSK 3, als dass er das elastische Moment über eine beträchtliche Rotation halten kann. Mit diesen Feststellungen soll verdeutlicht werden, dass die Momenten-Rotationsverhalten der Träger aus dem Slimfit-Stahl nur begrenzt in das Kategorisierungsmodell nach Figur 5 passen. Im Rahmen dieser Masterarbeit wird vorgeschlagen, das übergeordnete Verhalten von Schar 1 Träger für Bauteile aus Slimfit-Stahl als neue Querschnittsklasse 1 zu interpretieren. Jenes Momenten-Rotationsverhalten von Schar 2 wäre folglich als QSK 2 und jenes von Schar 3 als QSK 3 zu klassifizieren.

Bei dieser Versuchsreihe konnte kein Träger modelliert werden, welcher dem Verhalten eines QSK 4 Trägers nach Norm nahekommt. Da die weitere Vergrösserung des Flansches jedoch zu stark unrealistischen Profilabmessungen führen würde, wird auf eine zusätzliche Verbreiterung verzichtet.



Figur 55: Momenten-Rotationsverhalten bei der Variation der Flanschbreite b von 160 mm bis 510 mm an Trägern aus der neuartigen Stahlsorte S355M_SF

Die Resultate dieser Zuordnungen der Querschnittsklassen nach ihrem gezeigten Momenten-Rotationsverhalten im FEM-Modell sind in Tabelle 7 zusammengefasst. Es ist zu sehen, dass die Träger aus S355M nach der Norm in dieselbe oder in eine QSK höher eingestuft werden. So entspräche der S355M mit Bleite 310 mm nach Norm einer QSK 3, wogegen das positive Verhalten von Moment gegenüber Rotation eine günstigere QSK 2 rechtfertigen würde. Dasselbe Phänomen mit QSK 3 anstelle von QSK 4 ist für die S355M Träger mit 410 mm und 460 mm Flanschbreite zu erkennen.

Der Unterschied der Querschnittsklassifizierung nach Norm entgegen jener aus dem effektiven Momenten-Rotationsverhalten fällt für die Träger der Slimfit-Reihe noch extremer aus. So wird der S355M_SF mit einer Flanschbreite von 310 mm in der Norm in die QSK 3 eingestuft. Im Momenten-Rotationsverhalten zeigt dieser aber einen derart guten Verlauf, dass eine Querschnittseinteilung nach den neu definierten Stufen für die Klasse 1 reichen würde. Ähnlich sieht es bei den Slimfit-Trägern mit 410 mm und 460 mm Breite aus, welche eine Verbesserung von der QSK 4 zur QSK 2 erzielen könnten.

Tabelle 7: Vergleich der zugewiesenen QSK nach Norm und aus dem effektiven Momenten-Rotationsverhalten, sowie der Rückrechnung von neuen Grenzzahlen aufgrund dieser tatsächlichen Verhaltensweisen der virtuellen Träger

Stahlsorte	S355M:	S355M:	S355M:		S355M:	S355M:	S355M:	S355M:	S355M:		
Flanschbreite	b = 160mm	b = 210mm	b = 260mm		b = 310mm	b = 360mm	b = 410mm	b = 460mm	b = 510mm		
QSK nach SIA 263:2013	QSK 1	QSK 1	QSK 1		QSK 3	QSK 4	QSK 4	QSK 4	QSK 4		
QSK nach M-θ Verhalten	QSK 1	QSK 1	QSK 1		QSK 2	N/A	QSK 3	QSK 3	QSK 4		
Schlankheit (c/t)-Wert	4.0	5.5	7.1		8.7	N/A	11.8	13.3	14.9		
Effektiver Korrekturfaktor ε	0.68	0.68	0.68		0.68		0.68	0.68	0.68		
Neue Grenzzahl = $(c/t)/\epsilon$	5.8	8.1	10.4	11	12.7	N/A	14	17.3	20	21.9	
Stahlsorte	S355M_SF:	S355M_SF:	S355M_SF:		S355M_SF:	S355M_SF:	S355M_SF:	S355M_SF:	S355M_SF:		
Flanschbreite	b = 160mm	b = 210mm	b = 260mm		b = 310mm	b = 360mm	b = 410mm	b = 460mm	b = 510mm		
QSK nach SIA 263:2013	QSK 1	QSK 1	QSK 1		QSK 3	QSK 3	QSK 4	QSK 4	QSK 4		
QSK nach M-θ Verhalten	QSK 1	QSK 1	QSK 1		QSK 2	QSK 2	QSK 2	QSK 2	QSK 3		
Schlankheit (c/t)-Wert	4.0	5.5	7.1		8.7	10.2	11.8	13.3	14.9		
Effektiver Korrekturfaktor ε	0.79	0.79	0.79		0.79	0.79	0.79	0.79	0.79		
Neue Grenzzahl = $(c/t)/\epsilon$	5.0	6.9	8.9	11	10.9	11	12.8	14.8	16.7	17	18.7

Mit Hilfe dieser neuen Querschnittsklassen aus den effektiven Momenten-Rotationsverhalten ist es möglich, neue Grenzzahlen zu errechnen. Dazu wird die Schlankheit des einseitig gehaltenen Druckflanschsegmentes (c/t) jedes Trägers durch den Abminderungsfaktor ε des Materials dividiert. Somit ist es möglich, die alten Grenzzahlen nach SIA 263:2013 [5], welche in Formel 17 angegeben sind, für die beiden untersuchten Stahlsorten anzupassen. Neue Grenzzahlen sind für den herkömmlichen S355M in Formel 18 und für den neuartigen S355M_SF in Formel 19 vorgeschlagen. Diese gehen aus Tabelle 7 hervor. Da für den S355M_SF kein Träger mit dem Verhalten eines QSK 4 Trägers modelliert werden konnte, kann kein direkter Zahlenwert für die Grenze zwischen QSK 3 und QSK 4 angegeben werden. Diese jeweiligen Grenzwertzahlen behandeln spezifisch den Fall, dass der einseitig gehaltene Druckflansch unter reiner Druckbelastung massgebend wird.

$$\text{Grenzzahlen (Alt)} = \{9\epsilon; 10\epsilon; 14\epsilon\} \tag{17}$$

$$\text{Grenzzahlen (S355M)} = \{11\epsilon; 14\epsilon; 20\epsilon\} \tag{18}$$

$$\text{Grenzzahlen (S355M_SF)} = \{11\epsilon; 17\epsilon; \dots \epsilon\} \tag{19}$$

Diese neuen Grenzwerte sind dabei nicht als konkrete Vorschläge für die direkte Anwendung in der Dimensionierung anzuwenden. Sie sollen lediglich veranschaulichen, wie eine genauere Berücksichtigung des Momenten-Rotationsverhaltens zu einer effizienteren Querschnittsklassifizierung führen kann. Somit könnte ein wirtschaftlicherer Einsatz von Stahlbauteilen in der Baupraxis erreicht werden. Diese Grenzzahlen müssen jedoch zuerst in zukünftigen Forschungsarbeiten weiter untersucht und konkretisiert werden.

Als weiteren Punkt soll auf den folgenden Sachverhalt in den heute gültigen Normen hingewiesen werden: Die Berücksichtigung der Stahlgüte erfolgt durch den Abminderungsfaktor ε. Dieser wird nach Norm wie in Formel 8 berechnet, wobei die theoretische und nicht die effektive Fließspannung verwendet wird. Somit kann es zu grossen Unterschieden kommen, wie das Beispiel am S355M-Stahl zeigt. Denn dieser hat eine effektive Fließspannung von 509 N/mm², welche massiv über dem theoretischen Wert von 355 N/mm² liegt. Dementsprechend fällt auch der Abminderungsfaktor ε mit 0.68 deutlich kleiner aus als der nach Norm angegebene Wert von 0.714. Wie in Formel 8 ebenfalls zu sehen ist, geschieht die Berücksichtigung der verwendeten Stahlsorte einzig anhand der theoretischen Fließspannung. Sämtliche anderen Materialparameter wie Streckgrenze, Vorhandensein eines Fließplateaus oder wie ausgeprägt ein verfestigendes Verhalten auftritt, werden nicht berücksichtigt. Wie die Untersuchungen in dieser Arbeit jedoch gezeigt haben, haben diese Faktoren zum Teil grossen Einfluss auf das effektive Momenten-Rotationsverhalten. Demnach drängt sich die Frage auf, ob die Berücksichtigung der verwendeten Stahlsorte im Abminderungsfaktor ε von zusätzlichen Parametern abhängig gemacht werden sollte und nicht nur von der theoretischen Fließspannung.

6 Schlussfolgerung

Viele Untersuchungen zum Thema der Rotationskapazität sind bislang an normalen und hochfesten Stahlsorten durchgeführt worden. Besonders die hochfesten Stahlsorten weisen einen tiefen YR-Wert und ein sehr geringes verfestigendes Verhalten auf. Dies resultiert in einer reduzierten Rotationskapazität auf Bauteilebene, wie diverse Forschungsberichte in der Vergangenheit aufgezeigt haben. Im Fokus der vorliegenden Nachforschungen waren deshalb die neuartigen Materialeigenschaften des Slimfit-Stahls mit vergleichsweise hohem YR-Wert und direktem Übergang zu einem verfestigenden Verhalten. Es sollte untersucht werden, ob durch den Einsatz dieses neuen Stahls eine signifikant höhere Rotationskapazität auf Bauteilebene erzielt werden kann. Denn zum Duktilitätsverhalten eines solchen Baustahls besteht zur Zeit noch keine Datengrundlage.

Mittels physischer Experimente an geschweissten Blechträgern konnte das Momenten-Rotationsverhalten von acht unterschiedlichen Trägern studiert werden. Daraus ergaben sich die Erkenntnisse, dass die Rotationskapazität der Träger aus S355M_SF-Stahl rund Faktor 2 bis 4 höher liegen als jene der getesteten Träger aus herkömmlichen Stahlsorten. Zudem weisen diese neuartigen Träger auch massiv höhere maximale Momentwiderstände auf, als nach der Norm anzunehmen wären. Daraus kann geschlossen werden, dass sich die neuen Materialeigenschaften des ausgeprägten verfestigenden Verhaltens in Kombination mit einem grossen YR-Wert stark positiv auf die Rotationskapazität auswirken.

Weiter sollte ein Finite Element Modell erarbeitet und dessen wichtigste Input-Parameter evaluiert werden. Die Kalibrierung dieser Eingabegrößen erfolgte anhand der physisch getesteten Träger. Aus diesen Validierungsuntersuchungen ging hervor, dass die Wahl der verwendeten Imperfektionsform im virtuellen Modell von grosser Bedeutung für das resultierende Momenten-Rotationsverhalten ist. Der Faktor, mit welcher Amplitude diese Imperfektionsform angesetzt wird, spielt dabei eine untergeordnete Rolle. Damit konnte das Ziel einer realitätsnahen numerischen Prognose zum Momenten-Rotationsverhalten erreicht werden. Denn mit der Wahl der Imperfektionsfigur mit der ersten Eigenschwingungsform und einer Amplitude von 1 mm ergeben sich für QSK 3 bzw. QSK 1 Träger gute bis sehr gute Vergleichsresultate. Die leicht schlechtere Übereinstimmung der Numerik bei den QSK 3 Trägern kann mit dem stärkeren Beulverhalten im Druckflansch dieser Träger begründet werden. Dabei zeigten die Träger der QSK 3 Träger mehr ein lokales Versagen infolge von lokalen Beulerscheinungen. Hingegen verkippten sich die Träger der QSK 1 über das gesamte Mittelfeld. Somit kann das Versagen dieser Systeme mehr durch ein globales Phänomen beschrieben werden. Die Gegenüberstellung der berechneten Rotationskapazitäten aus Experiment und FEM-Modell zeigen gute Übereinstimmungen bei symmetrischen Versuchsabläufen. Die Abschätzung der maximalen Momentenwiderstände kann mit der numerischen Modellierung beinahe exakt oder nur mit geringer prozentualer Abweichung vorgenommen werden.

Die Vergleiche mit den Literaturdaten ergaben, dass eine Abschätzung dieses höchstmöglichen Momentes anhand der Formeln von Sawyer (1961) oder Lay & Galambos (1967) aus Quelle [8] teilweise realistische Resultate liefert. Die Berücksichtigung des detaillierten CSM-Modells nach Liew & Gardner (2015) [9] führt dabei nicht direkt zu einer Verbesserung der Resultate. Die Prognosen zur Rotationskapazität nach Bartsch et al. (2021) [6] liegt demgegenüber zum Teil deutlich neben den Ergebnissen der getesteten Träger.

Sowohl das DMS wie auch das DIC Verfahren konnte für die Verifizierung der grundlegenden Annahmen der Balkentheorie nach Bernoulli genutzt werden. Es kann bestätigt werden, dass sämtlicher Träger im Versuch eine ebenbleibende Dehnungsfläche bis in den hochplastischen Belastungsbereich beibehielten. Dies bedeutet, dass die fundamentale Annahme von ebenen

Dehnungsflächen bestätigt werden konnte. Bei der Transformierung dieser Dehnungen in Spannungen konnte weiter gezeigt werden, dass im elastischen Bereich die Spannungseben linear bleibt und sich diese dann effektiv zur angenommenen «Viereckverteilung» im plastischen Bereich wandelt. Der Slimfit-Stahl mit dem verfestigenden Verhalten fiel diesbezüglich durch eine zusätzliche Steigerung positiv auf.

Die direkte Gegenüberstellung von gemessenen Dehnungen aus DMS und DIC konnte ebenfalls erfolgreich abgeschlossen werden. Die Daten zeigen, dass beide Messmethoden die Realität korrekt abbilden und zu zuverlässigen Dehnungsmesswerten führen. Dabei können kleinere Messdifferenzen in den Versuchen auf die Verwölbung des Stegs um die schwache Achse zurückgeführt werden.

Zum Schluss wurde der Sachverhalt zur Querschnittsklassifikation nach SIA 263:2013 [5] untersucht. Die Variation der QSK anhand des Parameters der Flanschbreite ermöglichte es, die Momenten-Rotationsverhalten mit dem kalibrierten FEM-Modell zu studieren. Es zeigte sich, dass für den herkömmlichen S355M-Stahl die Theorieannahmen im Grundsatz erfüllt werden. Jedoch liegen die Grenzwerte der heutigen Normen stark auf der konservativen Seite, wodurch oft eine ungünstigere QSK zugewiesen wird, als dies das effektive Verhalten zulassen würde. Die Daten der Träger aus dem neuen S355M_SF-Stahl zeigten klar, dass dieses effektive Momenten-Rotationsverhalten nur schwer in das heute angenommene Konzept zu integrieren sind. Denn die stark positiven Momenten-Rotationsverläufe dieser Träger können durch die Norm nicht erfasst werden. Somit werden diese Träger massiv schlechter eingestuft und es kommt zu einem unökonomischen und unökologischen Einsatz des wertvollen Rohstoffs. Die Verbesserungen hinsichtlich massiv höherer Rotationskapazitäten und maximalen Momentenwiderstände können bei der Dimensionierung nach heutiger Norm folglich nicht genutzt werden.

7 Ausblick

Aus den am Ende des vorgehenden Kapitels genannten Gründen sind weitere Forschungen auf diesem Gebiet nötig. Im Rahmen dieser Arbeit konnte für zwei mögliche Querschnittsgeometrien ein Finite Element Modell kalibriert werden. Um die realitätsgetreue Prognose dieses numerischen Modells zu erhöhen, sollten weitere physische Versuche zu dessen Validierung durchgeführt werden. So sollten die besonders die Blechdicken und Steghöhen variiert werden. Ausserdem sollten die weiteren Experimente an veränderten statischen Systemen wie beispielsweise einem Zweifeldträger durchgeführt werden.

Mit Hilfe eines auf diese Art verfeinerten Modells sollten breit angelegte numerische Parameterstudien durchgeführt werden. Dies, um das effektive Momenten-Rotationsverhalten von Trägern mit unterschiedlichen QSK aus verschiedenen Stahlsorten zu erforschen. Anhand dieser Scharen von Kurven könnten Gruppen gebildet werden, um die Querschnittsklassifizierung zu optimieren. Die Generierung dieser FEM-Modelle und deren Zuteilung in Gruppen könnte dabei automatisiert und die Auswertung mittels «Maschine-Learning» erfolgen. Mit dem Ziel neue Grenzzahlen für die Querschnittsklassifizierung zu ermitteln, welche die Berücksichtigung des effektiven Momenten-Rotationsverhaltens besser zulassen. Erste mögliche Ergebnisse wurden in dieser Arbeit an den beiden Stahlsorten S355M und S355M_SF und dem Querschnittsklassenkriterium des einseitig gehaltenen Druckflansches auf reiner Druckbelastung vorgestellt.

Die Einteilung der Querschnittsklassen ist, wie gezeigt, unter anderem abhängig von den Materialeigenschaften. Nach jetziger Norm wird dies einzig indirekt über den Parameter der theoretischen Fließspannung berücksichtigt. Eine diversifizierte Berücksichtigung von günstigen Materialeigenschaften des jeweils verwendeten Stahls wäre daher wünschenswert. Dies, um beispielsweise die positiven Effekte von Stahlsorten mit hohen YR-Werten oder ausgeprägterem verfestigendem Verhalten, wie beim neuen Slimfit-Stahl besser in der Norm nutzbar zu machen.

Die Notwendigkeit von exakten und korrekten Messwerten ist für die Forschung von fundamentaler Bedeutung. Dabei sollten diese Messverfahren kostengünstig und wenig fehleranfällig sein, sowie eine grossflächige Datenauswertung ermöglichen. Diese Voraussetzungen werden von der DIC Messtechnik erfüllt. Um dieses Auswertungsverfahren jedoch noch weiter zu etablieren, sind zusätzliche Validierungsarbeiten nötig. Es sollten somit weitere Messgegenüberstellungen vorgenommen werden, um die Zuverlässigkeit zu erhöhen. Dies könnte anhand von anderen geprüften Systemen, Oberflächen oder Materialien erfolgen.

8 Literaturverzeichnis

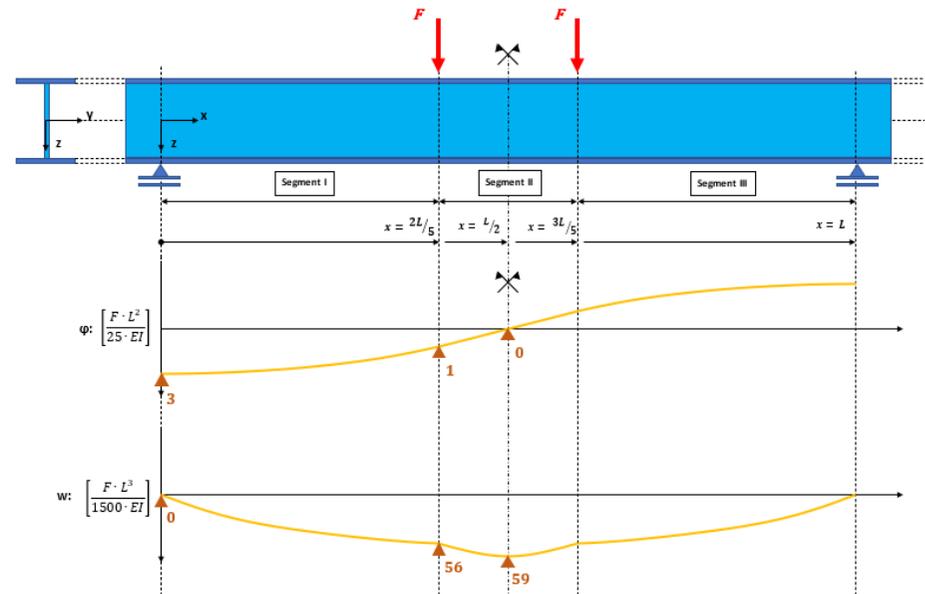
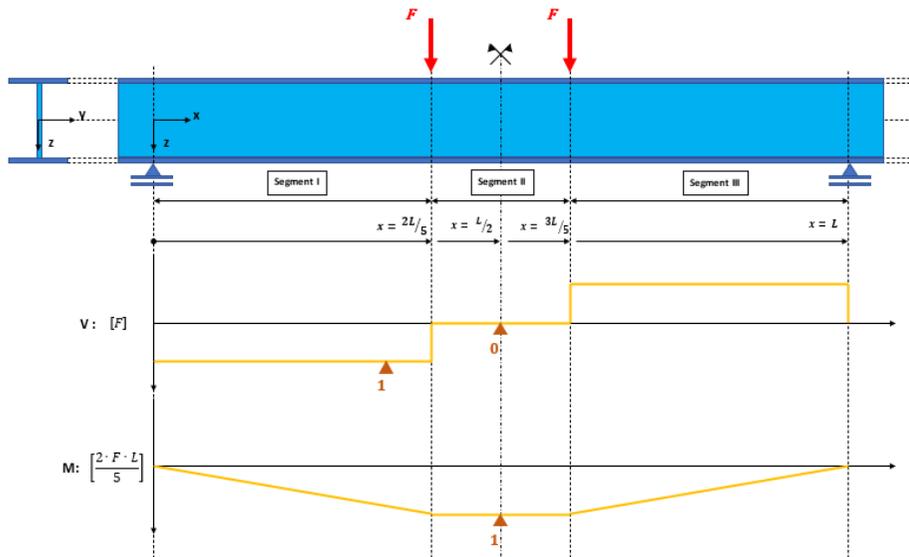
- [1] G. Haaijer, „Economy of high strength steel structural members,“ *Journal of the Structural Division*, Bd. 87, Nr. 8, pp. 1-24, 1961.
- [2] J. McDermott, „Plastic bending of A514 steel beams,“ *Journal of the Structural Division*, Bd. 95, Nr. 9, pp. 1851-1871, 1969.
- [3] H. S. Joo, J. Moon, B. H. Choi und H. E. Lee, „Rotational capacity and optimum bracing point of high strength steel I-girders,“ *Journal of Constructional Steel Research*, Bd. 88, pp. 79-89, 2013.
- [4] N. Schillo und M. Feldmann, „The rotational capacity of beams made of high-strength steel,“ *Proceedings of the Institution of Civil Engineers-Structures and Buildings*, Bd. 170, Nr. 9, pp. 641-652, 2017.
- [5] *SIA 263:2013; Stahlbau, Schweizer Ingenieur- und Architektenverein, Zürich 2014.*
- [6] H. Bartsch, F. Eyben, S. Schaffrath und M. Feldmann, „On the plastic design of high-strength steel beams,“ *Steel Construction*, Bd. 14, Nr. 4, pp. 222-235, 2021.
- [7] „EN 1993-1-1:2005 + AC:2009. Eurocode 3, Design of steel structures – Part 1-1: General rules and rules for buildings.“
- [8] V. Gioncu und D. Petcu, „Available rotation capacity of wide-flange beams and beam-columns Part 1. Theoretical approaches,“ *Journal of Constructional Steel Research*, Bd. 43, Nr. 1-3, pp. 161-217, 1997.
- [9] A. Liew und L. Gardner, „Ultimate capacity of structural steel cross-sections under compression, bending and combined loading,“ *Structures*, Bd. 1, pp. 2-11, 2015.
- [10] *GOM Inspect (1.19) [Software]. (2021). Zeiss Company. <https://www.gom-inspect.com/index.php>.*
- [11] *Vic-3D Digital Image Correlation (9.1.6) [Software]. (2020). Correlated Solutions, Inc. <https://www.correlatedsolutions.com/vic-3d/>.*
- [12] *Abaqus/CAE (6.23) [Software]. (2020). Dassault Systèmes Simulia Corp. <https://www.3ds.com/de/produkte-und-services/simulia/produkte/abaqus/>.*

9 Anhang

9.1 Anhangsverzeichnis

Anhang A: Analytische Lösung nach Balkentheorie	68
Anhang B: Anwendung des CSM Modells auf die vier verwendete Stahlsorten	69
Anhang C: Imperfektionen aus 3D Scanning	70
Anhang D: Bilder von Experimentträgern während Versuchen	72
Anhang E: Zusätzliche Graphiken aus Experiment zu Momenten-Rotationsverhalten	73
Anhang F: Zusätzliche Graphiken aus DIC Messungen.....	74
Anhang G: Zusätzliche Graphiken aus Numerik zu Momenten-Rotationsverhalten	75
Anhang H: Zusätzliche Graphiken der Gegenüberstellung von Experiment, FEM-Modell und Literatur im Momenten-Rotationsdiagramm.....	76

Anhang A: Analytische Lösung nach Balkentheorie



Segment I:

$$\{0 \leq x \leq 2L/5\}$$

$$V_I(x) = F$$

$$M_I(x) = Fx$$

$$\varphi_I(x) = \frac{-1}{EI} \cdot \left[\frac{1}{2} Fx^2 - \frac{3}{25} FL^2 \right]$$

$$w_I(x) = \frac{-1}{EI} \cdot \left[\frac{1}{6} Fx^3 - \frac{3}{25} FL^2 x \right]$$

Segment II:

$$\{2L/5 \leq x \leq 3L/5\}$$

$$V_{II}(x) = 0$$

$$M_{II}(x) = \frac{2}{5} FL$$

$$\varphi_{II}(x) = \frac{-1}{EI} \cdot \left[\frac{2}{5} FLx - \frac{1}{5} FL^2 \right]$$

$$w_{II}(x) = \frac{-1}{EI} \cdot \left[\frac{1}{5} FLx^2 - \frac{1}{5} FL^2 x + \frac{4}{375} FL^3 \right]$$

Segment III:

$$\{3L/5 \leq x \leq L\}$$

$$V_{III}(x) = -F$$

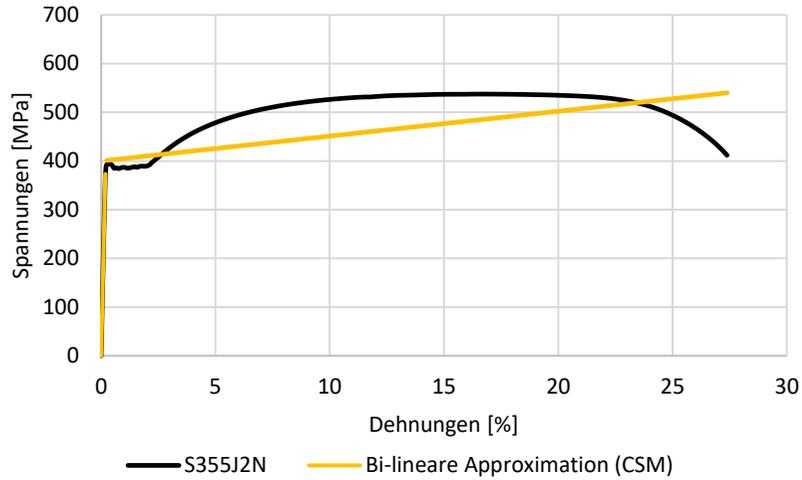
$$M_{III}(x) = -Fx + FL$$

$$\varphi_{III}(x) = \frac{-1}{EI} \cdot \left[\frac{-1}{2} Fx^2 + FLx - \frac{19}{50} FL^2 \right]$$

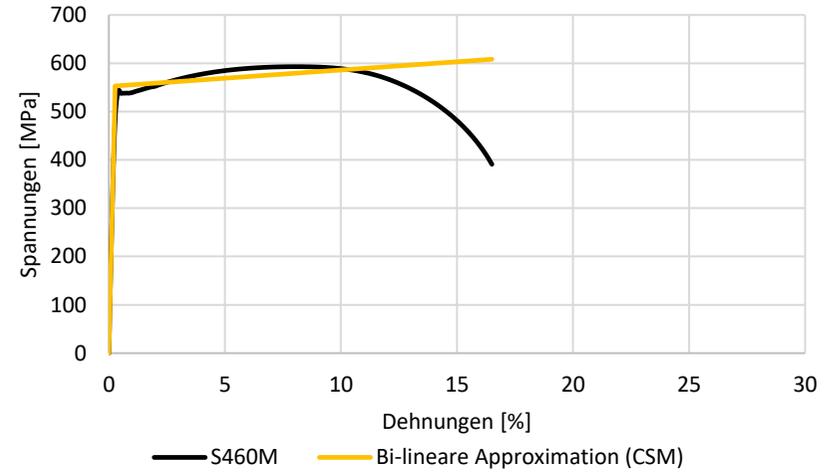
$$w_{III}(x) = \frac{-1}{EI} \cdot \left[\frac{-1}{6} Fx^3 - \frac{1}{2} FLx^2 - \frac{19}{50} FL^2 x + \frac{7}{150} FL^3 \right]$$

Anhang B: Anwendung des CSM Modells auf die vier verwendete Stahlsorten

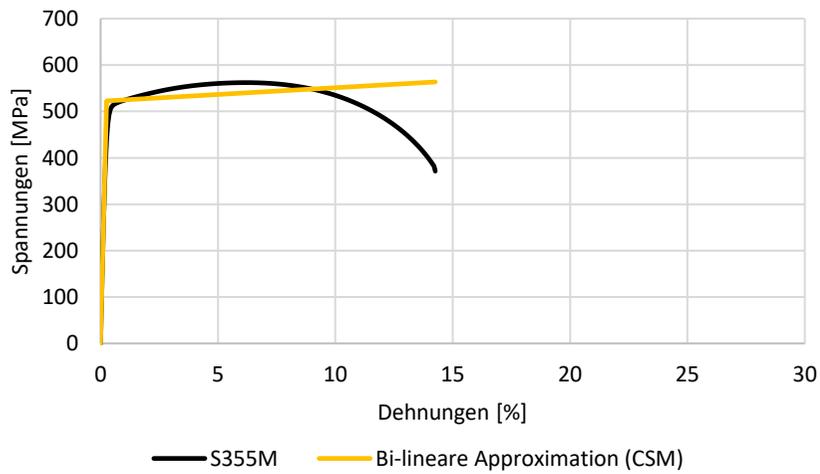
CSM -- S355J2N



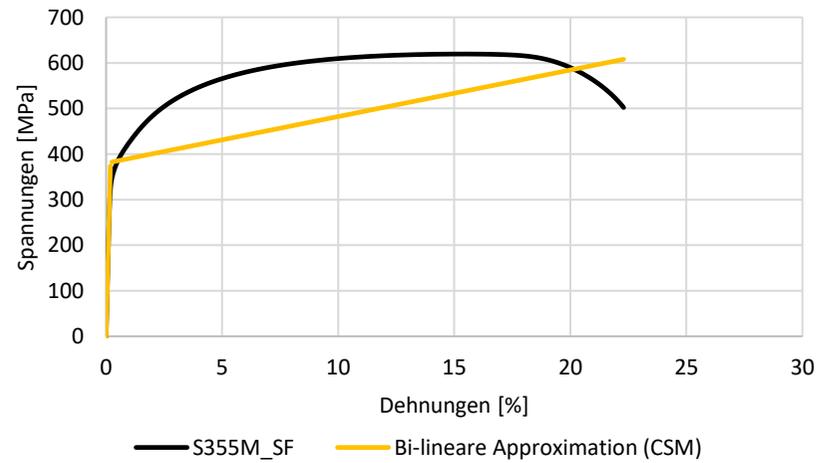
CSM -- S460M



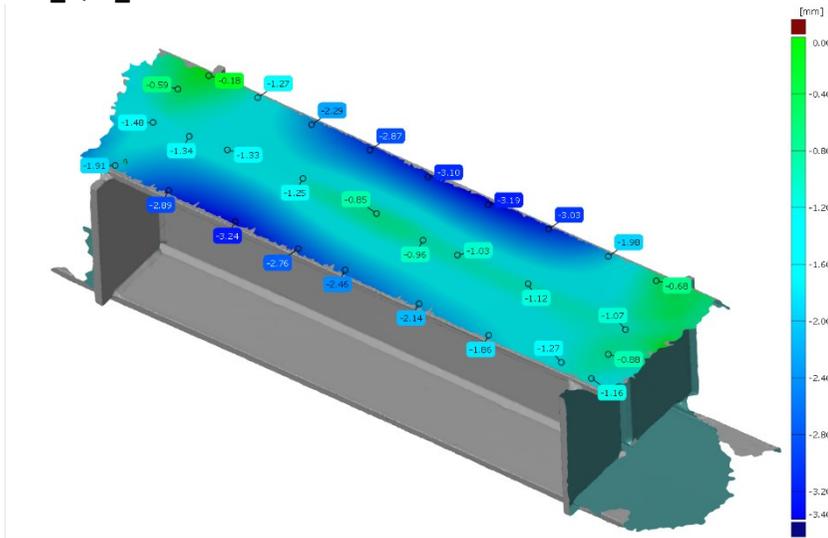
CSM -- S355M



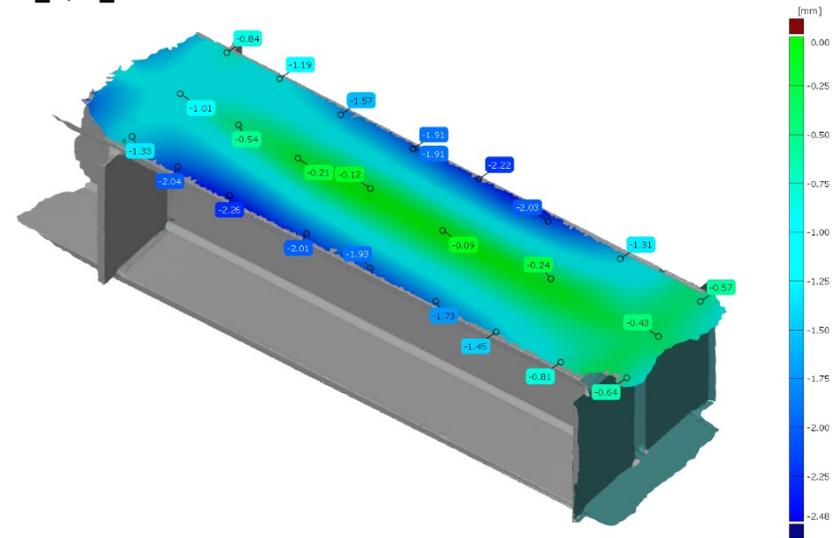
CSM -- S355M_SF



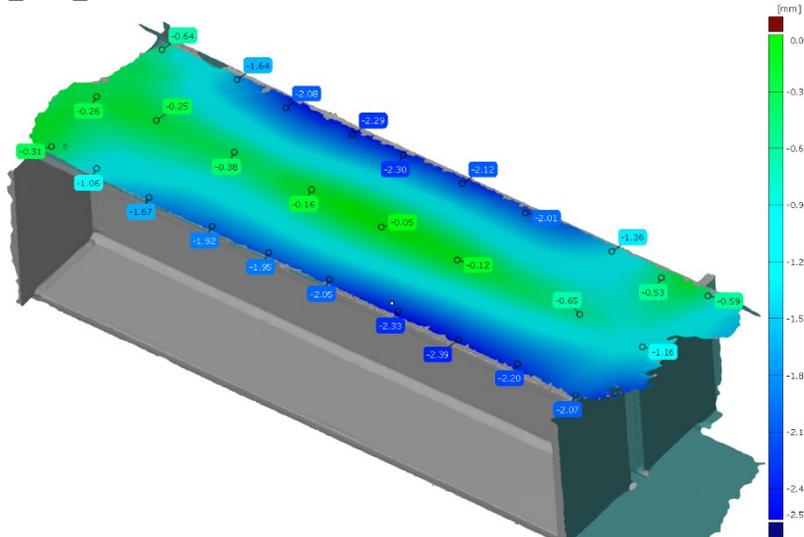
S355J2N_QSK_3:



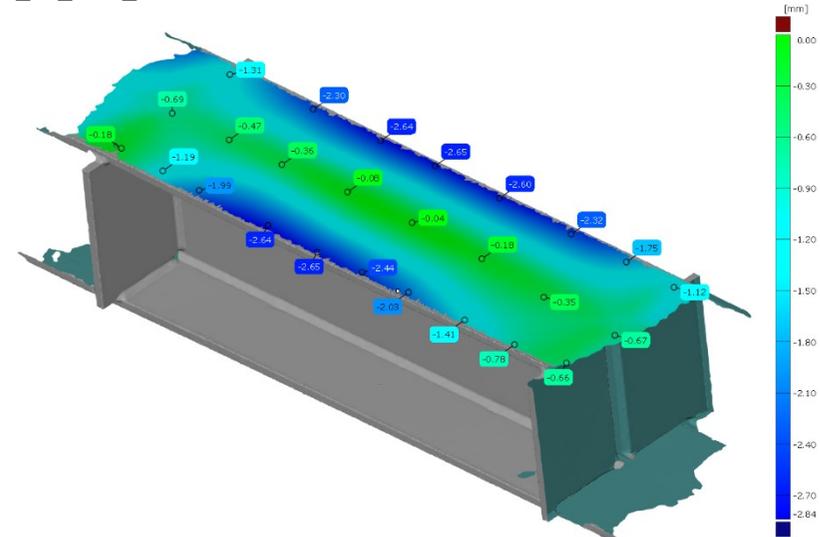
S460M_QSK_3:



S355M_QSK_3:



S355M_SF_QSK_3:



Anhang D: Bilder von Experimentträgern während Versuchen

S355J2N_QSK_1:



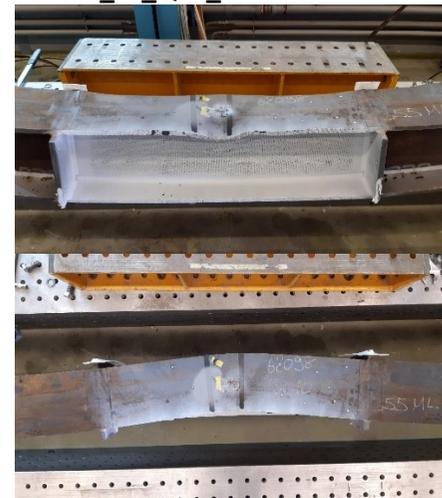
S460M_QSK_1:



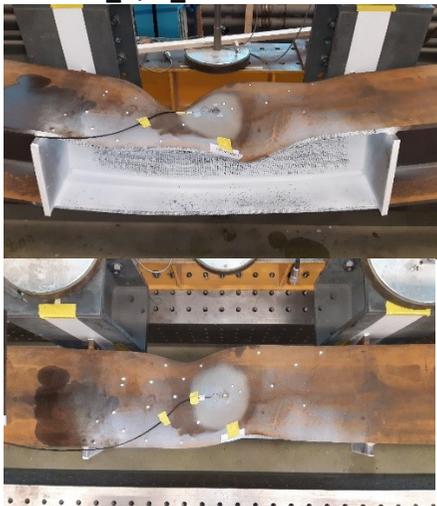
S355M_QSK_1:



S355M_SF_QSK_1:



S355J2N_QSK_3:



S460M_QSK_3:



S355M_QSK_3:

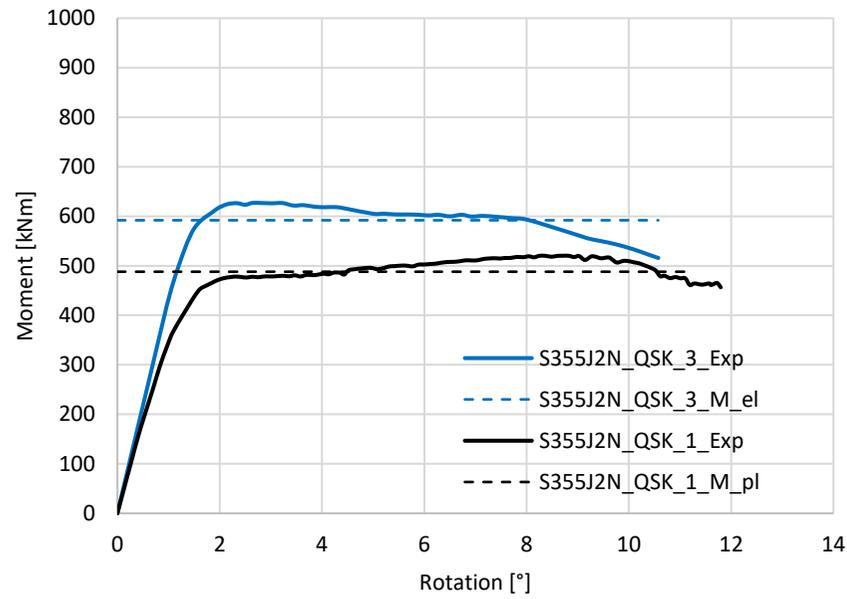


S355M_SF_QSK_3:

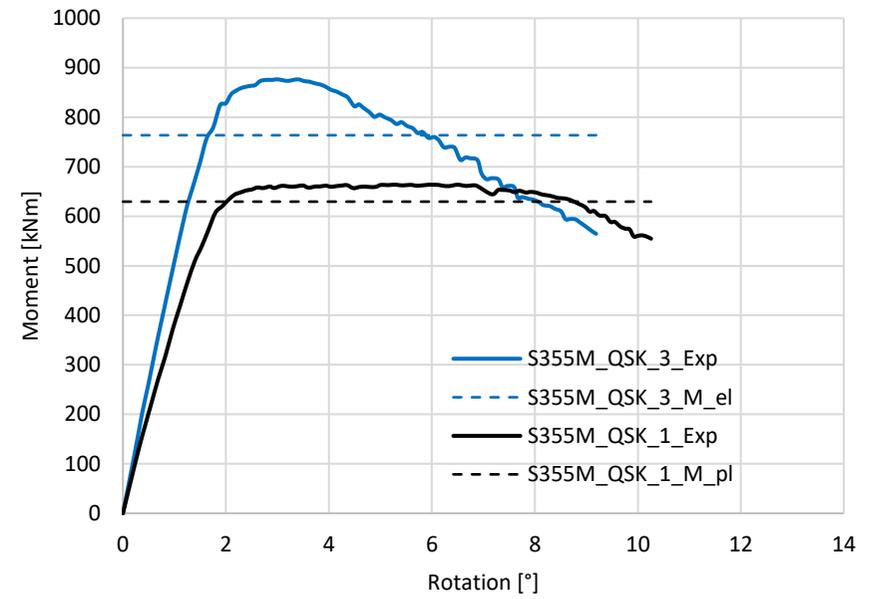


Anhang E: Zusätzliche Graphiken aus Experiment zu Momenten-Rotationsverhalten

Moment - Rotation -- S355J2N:

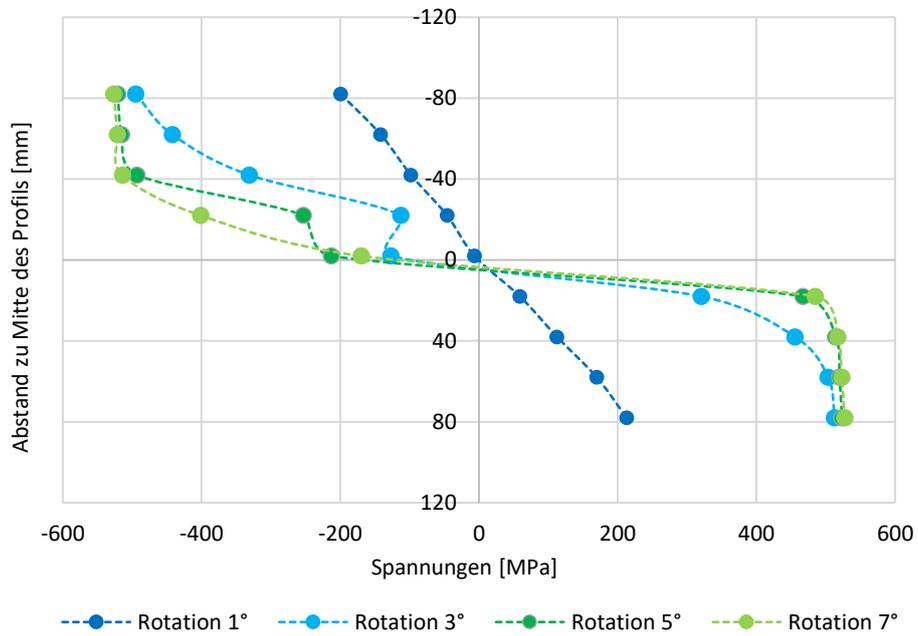


Moment - Rotation -- S355M:

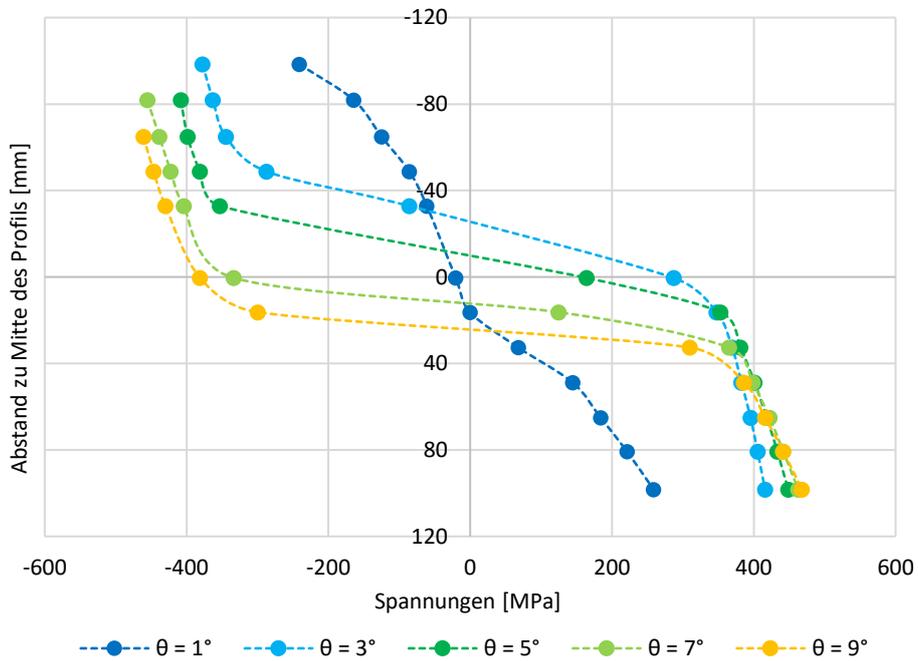


Anhang F: Zusätzliche Graphiken aus DIC Messungen

Spannungen im Steg über QS-Ebene aus DIC -- S355M_QSK_1:

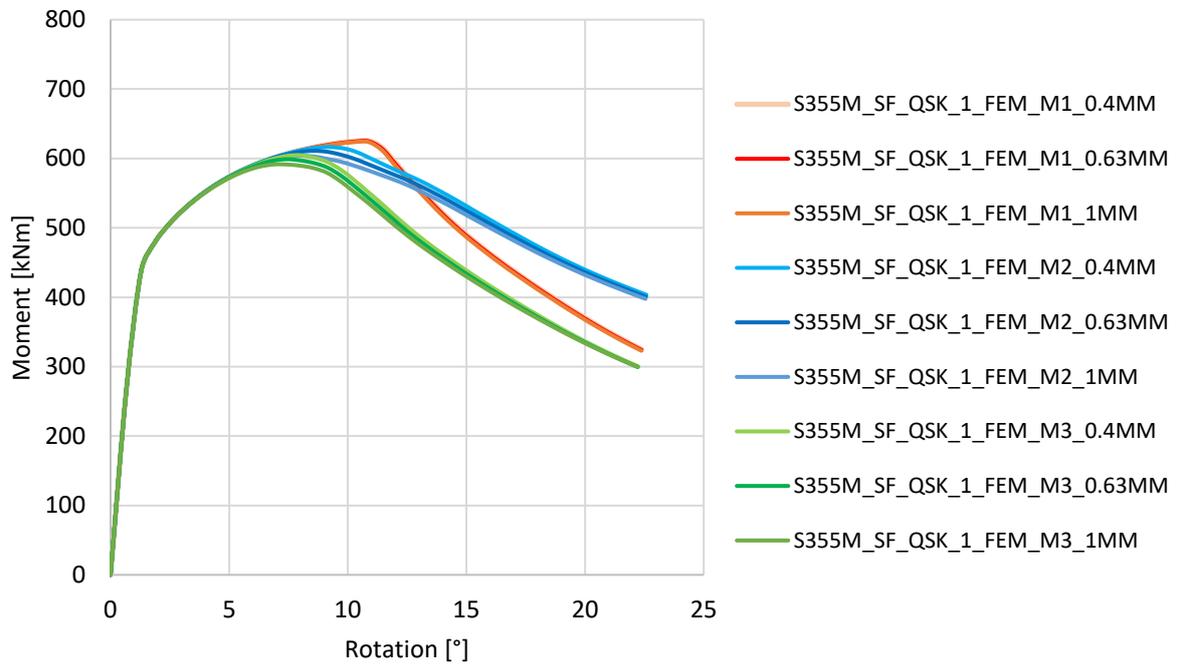


Spannungen im Steg über QS-Ebene aus DIC -- S355M_SF_QSK_3:

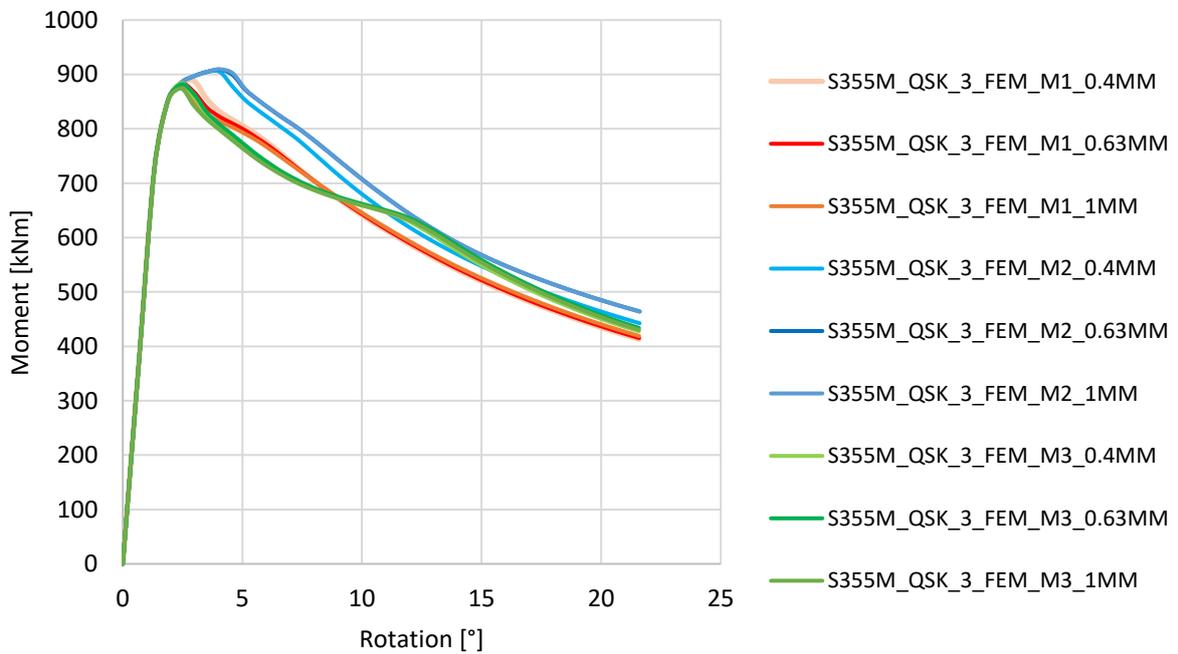


Anhang G: Zusätzliche Graphiken aus Numerik zu Momenten-Rotationsverhalten

Moment - Rotation -- S355M_SF_QSK_1:

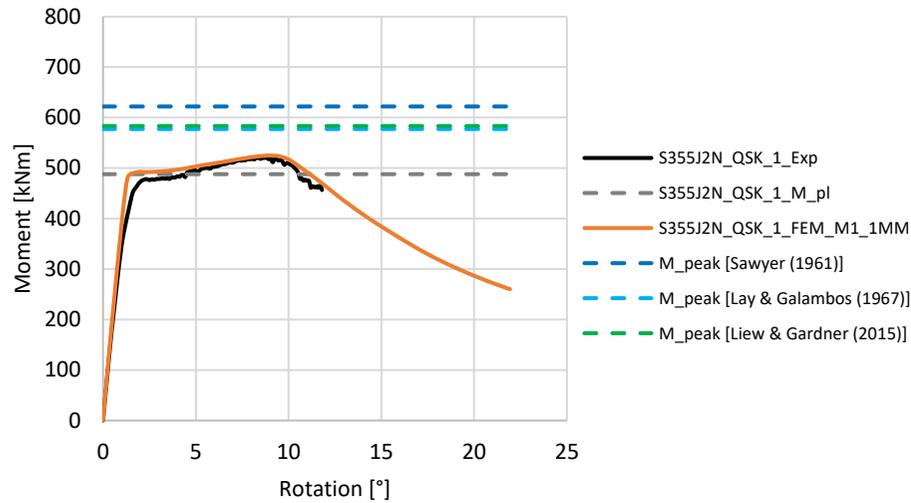


Moment - Rotation -- S355M_QSK_3:

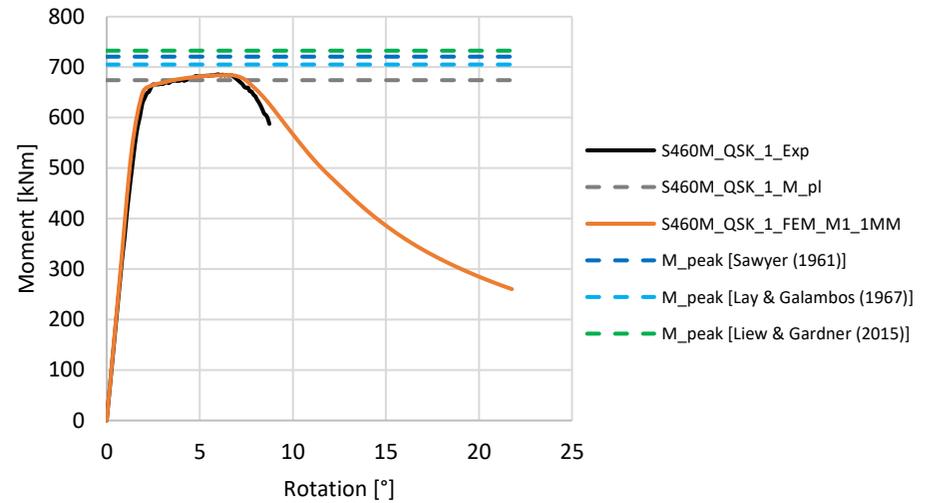


Anhang H: Zusätzliche Graphiken der Gegenüberstellung von Experiment, FEM-Modell und Literatur im Momenten-Rotationsdiagramm

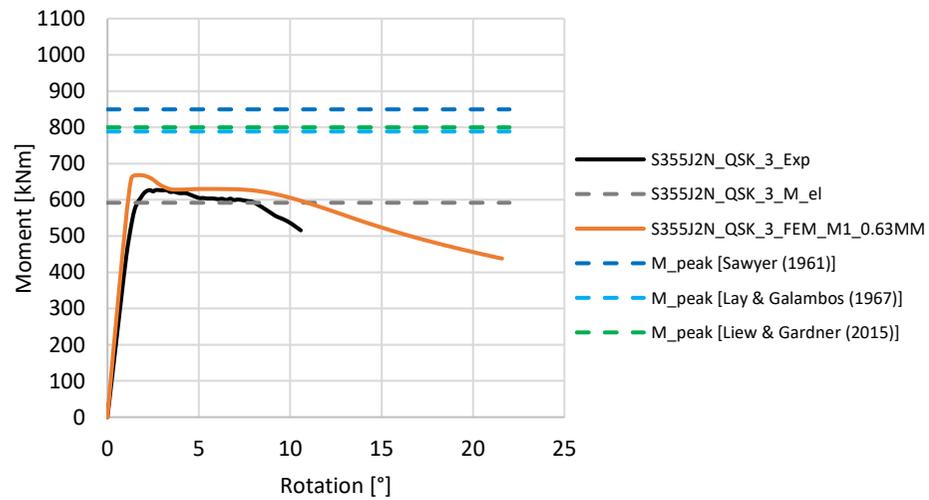
Moment - Rotation -- S355J2N_QSK_1:



Moment - Rotation -- S460M_QSK_1:



Moment - Rotation -- S355J2N_QSK_3:



Moment - Rotation -- S460M_QSK_3:

