

# Inhaltsverzeichnis /Content

1	Einleitung / Introduction .....	1
1.1	Anlass für den Forschungsantrag / Reason for research .....	2
1.2	Ausgangssituation / Initial situation .....	3
1.3	Stand der Forschung / State of research .....	5
1.3.1	Prozesssimulation / Process simulation .....	7
1.3.2	Struktursimulation / Structural simulation .....	8
1.3.3	Werkstoffsimulation / Material simulation .....	8
1.3.4	Simulationswerkzeuge / Simulation tools .....	9
1.3.5	Nichtlineare Strukturberechnung / Non-linear structural calculation .....	9
1.3.6	Weitere Möglichkeiten der Traglastberechnung / Further opportunities for buckling load calculation .....	10
2	Methodische Vorgehensweise / Proceeding .....	11
2.1	Auswahl und Herstellung der Detailproben für die Schweißsimulation / Selection and production of test specimens for the welding simulation .....	13
2.1.1	Träger mit wellenförmig profiliertem Steg / I-beam with sin-profiled web	13
2.1.2	Komplexe Knotenstruktur / Truss joint .....	14
3	Bestimmung der mechanischen Werkstoffkennwerte / Determination of mechanical properties .....	17
3.1	Zugversuche an Halbzeugen / Tensile tests .....	17
3.1.1	Zugversuche - Träger mit wellenförmig profiliertem Steg / Tensile tests - I-beam with sin-profiled web .....	17
3.1.2	Zugversuche - komplexe Knotenstruktur / Tensile tests - truss joint .....	19
3.2	Härtemessungen an Schweißnähten / Hardness measurements at welds .....	24
3.2.1	Härtemessungen - Träger mit wellenförmig profiliertem Steg / Hardness measurements - I-beam with sin-profiled web .....	24
3.2.2	Härtemessungen - komplexe Knotenstruktur / Hardness measurements - at the truss joint .....	25
4	Experimentell durchgeführte Schweißversuche an Detailproben / Welding of test specimens .....	31
4.1	Versuchsaufbau für Detailproben / Welding setup for test specimens .....	31
4.1.1	Versuchsaufbau - Träger mit wellenförmig profiliertem Steg / Welding setup - I-Beam with sin-profiled web .....	31
4.1.2	Versuchsaufbau - komplexe Knotenstruktur / Welding setup - truss joint	32
4.2	Verwendete Schweißparameter / Welding parameters .....	33

4.2.1	Schweißparameter - Träger mit wellenförmig profiliertem Steg / Welding parameters - I-Beam with sin-profiled web .....	33
4.2.2	Schweißparameter komplexe Knotenstruktur / Welding parameters truss joint.....	34
4.3	Messung der Temperaturen / Temperature measurements .....	35
4.3.1	Temperaturmessungen - Träger mit wellenförmig profiliertem Steg / Temperature measurements - I-Beam with sin-profiled web .....	35
4.3.2	Temperaturmessungen - komplexe Knotenstruktur / Temperature measurements - truss joint .....	38
4.4	Messung der Schweißverzüge / Measurements of welding distortions.....	43
4.4.1	Schweißverzüge - Träger mit wellenförmig profiliertem Steg / Welding distortions - I-beam with sin-profiled web.....	43
4.4.2	Schweißverzüge - komplexe Knotenstruktur / Welding distortions - truss joint.....	44
4.5	Messung der Schweißeigenspannungen / Measurement of welding residual stresses .....	47
4.5.1	Schweißeigenspannungen - Träger mit wellenförmig profiliertem Steg / Welding residual stresses - I-beam with sin-profiled web .....	47
4.5.2	Schweißeigenspannungen - komplexe Knotenstruktur / Welding residual stresses - truss joint.....	48
5	FEM-Berechnungen Schweißsimulation / Welding simulation .....	49
5.1	Werkstoffkennwerte / Material properties .....	49
5.2	FE-Modelle / FE models .....	51
5.2.1	Netz - Träger mit wellenförmig profiliertem Steg / Mesh - I-beam with sin-profiled web .....	53
5.2.2	Netz - komplexe Knotenstruktur / Mesh - truss joint .....	53
5.3	Temperaturfeldberechnung / Thermal analysis.....	54
5.3.1	Temperaturfeld - Träger mit wellenförmig profiliertem Steg / Thermal analysis - I-beam with sin-profiled web .....	54
5.3.2	Temperaturfeld - komplexe Knotenstruktur / Thermal analysis - truss joint.....	55
5.4	Verzugsberechnungen / Calculation of distortions.....	58
5.4.1	Verzüge - Träger mit wellenförmig profiliertem Steg / Distortions - I-beam with sin-profiled web .....	58
5.4.2	Verzüge - komplexe Knotenstruktur / Distortions - truss joint .....	58
5.5	Eigenspannungsberechnungen / Calculation of welding residual stresses.....	64
5.5.1	Eigenspannungen - Träger mit wellenförmig profiliertem Steg / Welding residual stresses - I-beam with sin-profiled web .....	64

5.2	Eigenspannungen - komplexe Knotenstruktur / Welding residual stresses - truss joint .....	67
6	Experimentelle Untersuchungen / Experiments .....	72
6.1	Allgemeines / General .....	72
6.2	Messtechnik / Measuring technique .....	72
6.2.1	Messung der Verformungen und Kräfte / Measurement of displacements and forces .....	73
6.2.2	Messung der Längsdehnungen / Longitudinal strain measurement .....	74
6.3	Träger mit wellenförmig profiliertem Steg / I-beam with sin-profiled web .....	75
6.3.1	Allgemeines / General .....	75
6.3.2	Theoretische Vorstudien und Versuchsaufbau / Pre-studies and test setup .....	75
6.3.3	Versuchsanlage / Test setup .....	76
6.3.4	Versuchsprogramm / Testing schedule .....	77
6.3.5	Ausgewählte Messstellen / Measuring point positions .....	78
6.3.6	Versuchsergebnisse / Results .....	79
6.4	Komplexe Knotenstruktur / Truss joint .....	93
6.4.1	Allgemeines / General .....	93
6.4.2	Theoretische Vorstudien, Versuchsaufbau und Messstellen / Pre-studies, test setup and measuring point positions .....	93
6.4.3	Versuchsanlage / Test facility .....	95
6.4.4	Versuchsprogramm / Testing schedule .....	98
6.4.5	Versuchsergebnisse / Results .....	98
6.4.6	Materialgesetz / Material law .....	101
6.5	Kurzstabversuch / Stub Column Test (SCT) .....	101
6.5.1	Allgemeines / General .....	101
6.5.2	Theoretische Vorstudien und Messstellen / Pre-studies and measuring point positions .....	101
6.5.3	Versuchsprogramm / Testing schedule .....	103
6.5.4	Versuchsergebnisse / Results .....	103
6.5.5	Materialgesetz / Material law .....	104
7	Numerische Untersuchungen / FE analysis .....	106
7.1	Allgemeines / General .....	106
7.2	Nichtlineare Traglastanalysen / Non-linear ultimate load analysis .....	107
7.3	Modellierung, Geometrie und Diskretisierung / Geometrie and mesh .....	107
7.3.1	Diskretisierung der Modelle / Meshing .....	108
7.3.2	Randbedingungen / Boundary conditions .....	111

7.4	Parameterstudien / Parameter studies .....	113
7.5	Allgemeines und Kalibrierung / General and calibration .....	113
7.5.1	Materialgesetz / Material law .....	115
7.5.2	Studien zum Einfluss der geometrischen (Ersatz-) Imperfektionen / Influence of geometrical imperfections .....	124
7.5.3	Studien zum Einfluss der strukturellen Imperfektionen aus dem Schweißprozess / Influence of structural imperfections due to the welding process .....	134
8	Ableitung verbesserter ingenieurmäßiger Modelle / Development of improved engineering models .....	143
8.1	Allgemeines / General .....	143
8.2	Grundlagen / Fundamentals .....	144
8.2.1	Normative Situation / Current standards .....	144
8.2.2	Elastisches Schrumpfkraftmodell für die Ermittlung von Längseigen- spannungen / Elastic shrinkage force model for longitudinal residual stress calculation .....	145
8.3	Gegenüberstellung der analytischen, numerischen und experimentellen Ergebnisse / Comparison of the analytical, numerical and experimental results	155
8.3.1	Träger mit wellenförmig profiliertem Steg / I-Beam with sin-profiled web	155
8.3.2	Komplexe Knotenstruktur / Truss joint .....	158
8.3.3	Kurzstabversuch / Stub Column Test (SCT) .....	159
8.3.4	Übertragbarkeit auf andere Stahlleichtbaustrukturen / Transferability to other steel lightweight constructions .....	163
8.4	Ableitung von Empfehlungen zur Berechnung der Tragfähigkeit (Leitfaden) / Recommendations for the ultimate load calculation .....	173
9	Fazit und Ausblick / Summary and outlook .....	175
10	Literaturverzeichnis / Bibliography .....	177