

AiF-IGF-Verbundprojekt

**Anwendungsnahe Schweißsimulation
komplexer Strukturen**

Inhaltsverzeichnis

1.	Einleitung	1
2.	Schweißsimulation „Stand der Technik“	5
2.1.	Teilprojekt 1 (<i>ifs</i>)	5
2.1.1.	Prozesssimulation	7
2.1.2.	Struktursimulation	8
2.1.3.	Werkstoffsimulation	9
2.2.	Teilprojekt 2 (IWM)	10
2.2.1.	Local-Global-Methode	11
2.2.2.	Macro-Bead-Methode	11
2.2.3.	Shell-Solid-Ansatz	12
2.3.	Teilprojekt 3 (<i>iwb</i>)	13
2.3.1.	Schweißstruktursimulation	13
2.3.2.	Ansätze zur integrativen Betrachtung der thermischen Prozess-Struktur-Simulation	16
2.3.3.	Schlussfolgerungen	19
2.4.	Teilprojekt 4 (LFT)	21
3.	Aufbau des Verbundprojektes	26
3.1.	Verknüpfung der Teilprojekte	26
3.2.	Bauteilauswahl und Herstellung	27
3.2.1.	Ebenes Blech (Anwendungsfall 1)	28
3.2.2.	Demonstrator Profilknoten (Anwendungsfall 2)	29
3.2.3.	Demonstrator Rahmen (Anwendungsfall 3)	30
3.3.	Schweißparameter	32
3.3.1.	Schweißparameter Profilknoten	32
3.3.2.	Schweißparameter Rahmen	35
4.	Ergebnisse des Teilprojektes 1 (<i>ifs</i>) – Verzugsberechnungen an einer lichtbogengeschweißten komplexen Trägerstruktur aus dem Schienenfahrzeugbau	37
4.1.	Methodische Vorgehensweise	37
4.2.	Experimentell durchgeführte Schweißversuche	38
4.3.	Berechnungsergebnisse	38
4.3.1.	Eingesetzte Software	38

4.3.2.	Werkstoffmodelle und Kennwerte	38
4.3.3.	Modellierung des Zusatzmaterials	39
4.3.4.	Modellierung der Spanner	39
4.4.	FE-Modelle	40
4.4.1.	Abgeleitete Maße der Nahtquerschnitte	40
4.4.2.	Profilknoten	40
4.4.3.	Rahmen	43
4.5.	Abgleich der verwendeten Wärmequelle	44
4.5.1.	Naht 1	45
4.5.2.	Naht 2	47
4.5.3.	Naht 3	49
4.5.4.	Naht 4	51
4.6.	Mechanische Berechnung des Verzugs	53
4.6.1.	Naht 1, freie Einspannung, Variation der Darstellung der Punktung	53
4.6.2.	Naht 1 bis 4, steife Einspannung, Winkelverzug	55
4.6.3.	Rahmenstruktur, durchgeführte Berechnung	57
4.6.4.	Rahmenstruktur, Berechnungsergebnisse	57
4.7.	Zusammenfassung	60
5.	Ergebnisse des Teilprojektes 2 (IWM) – Effiziente numerische Schweißsimulation großer Strukturen	61
5.1.	Ausgangssituation und Motivation	61
5.2.	Ableiten optimaler Vernetzungsstrategien	61
5.3.	Ableiten optimaler Rechenalgorithmen	65
5.4.	Entwicklung einer Routine zum automatisierten Temperaturfeldabgleich .	66
5.5.	Entwicklung einer neuen Rechenmethode für Verzugs- und Eigenspannungsberechnungen unter Ausnutzung quasi-stationärer Bedingungen	71
5.6.	Berücksichtigung eines vorgelagerten Umformprozesses in der Schweißsimulation	75
5.7.	Zusammenfassung	75
6.	Ergebnisse des Teilprojektes 3 (iwb) – Simulationsgestützte, bauteilbezogene Analyse industriell relevanter Einspannsituationen beim Schweißen	77
6.1.	Ausgangssituation und Motivation	77
6.2.	Vorgehensweise	78
6.2.1.	Demonstrator	79

6.2.2.	Referenzszenario und Simulationsmodell	80
6.3.	Modellierung von mechanischen Spannelementeigenschaften	80
6.3.1.	Aufbau zur Bestimmung der Reibungskraft	80
6.3.2.	Aufbau zur Bestimmung der Federkraft	81
6.3.3.	Ausgewählte Ergebnisse der Ermittlung der Reibkoeffizienten	82
6.3.4.	Ausgewählte Ergebnisse der Bestimmung der Federsteifigkeiten	83
6.4.	Simulationsuntersuchungen	84
6.4.1.	Ergebnisse der Messungen	84
6.4.2.	Einspanmodellierung und Simulationsergebnisse	85
6.4.3.	Sensitivitätsanalyse ausgewählter Einflussgrößen	88
6.4.4.	Möglichkeiten zur vereinfachten Einspanmodellierung	89
6.5.	Diskussion	90
7.	Ergebnisse des Teilprojektes 4 (LFT) – Hybride Modelle zur rechnerunterstützten Verzugsvorhersage und -minimierung von geschweißten Großstrukturen	91
7.1.	Allgemeine Bedingungen und Rahmen der Modelle	91
7.1.1.	Allgemeine Bedingungen und Annahmen	91
7.1.2.	Allgemeine Rahmen der Untersuchungen	92
7.2.	Entwicklung und Umsetzung mathematischer Modelle	93
7.2.1.	Das Maximaltemperaturmodell	93
7.2.1.1.	Berechnung der Maximaltemperaturen	93
7.2.1.2.	Temperaturübertragung	95
7.2.1.3.	Elastisch-plastische FE-Analyse	96
7.2.1.4.	Verifizierung und Bewertung des Modells	97
7.2.2.	Das Global-Lokal-Global-Modell	98
7.2.2.1.	Bestimmung der Struktursteifigkeit	100
7.2.2.2.	Berechnung der plastischen Dehnungen am lokalen Modell	101
7.2.2.3.	Übertragung der plastischen Dehnungen auf das globale Modell und Berechnung der Verzüge	103
7.2.2.4.	Verifizierung und Bewertung des Modells	103
7.2.3.	Das hybride Schrumpfkraftmodell	104
7.2.3.1.	Das analytische Schrumpfkraftmodell	105
7.2.3.2.	Umsetzung des Schrumpfkraftmodells in einer Berechnungssoftware „WELDIS" (Weld Distortions)	107
7.2.3.3.	Verifizierung von WELDIS	108

7.2.3.4.	Kopplung	108
7.2.3.5.	Verifizierung und Bewertung des hybriden Schrumpfkraftmodells	109
7.3.	Umsetzung und Auswertung der Modelle an komplexen Strukturen	110
7.3.1.	Umsetzung und Bewertung der Modelle an einem Profilknoten (Anwendungsfall 2)	110
7.3.1.1.	Anwendung des Maximaltemperaturmodells	110
7.3.1.2.	Anwendung des Global-Lokal-Global-Modells	111
7.3.1.3.	Anwendung des hybriden Schrumpfkraftmodells	112
7.3.2.	Zusammenfassung für alle hybriden Modelle	113
7.3.3.	Verzugsberechnung einer industrierelevanten komplexen Struktur (Anwendungsfall 3)	115
7.4.	Bewertung der hybriden Modelle	117
8.	Zusammenfassung der erzielten Ergebnisse und deren Anwendungsmöglichkeiten	118
8.1.	Kurzfassung und verwertbare Ergebnisse Teilprojekt 1 (<i>ifs</i>)	118
8.2.	Kurzfassung und verwertbare Ergebnisse Teilprojekt 2 (IWM)	120
8.3.	Kurzfassung und verwertbare Ergebnisse Teilprojekt 3 (<i>iwb</i>)	122
8.4.	Kurzfassung und verwertbare Ergebnisse Teilprojekt 4 (LFT)	123
9.	Literatur	125