

Markus Plank, Björn Frettlöhr,
Jan Quappen, Werner Sobek

Strukturoptimierte Türme für Offshore – Windenergieanlagen aus UHFFB in Segmentbauweise

F 2935

Bei dieser Veröffentlichung handelt es sich um die Kopie des Abschlussberichtes einer vom Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung -BMVBS- im Rahmen der Forschungsinitiative »Zukunft Bau« geförderten Forschungsarbeit. Die in dieser Forschungsarbeit enthaltenen Darstellungen und Empfehlungen geben die fachlichen Auffassungen der Verfasser wieder. Diese werden hier unverändert wiedergegeben, sie geben nicht unbedingt die Meinung des Zuwendungsgebers oder des Herausgebers wieder.

Dieser Forschungsbericht wurde mit modernsten Hochleistungskopierern auf Einzelanfrage hergestellt.

Die Originalmanuskripte wurden reprototechnisch, jedoch nicht inhaltlich überarbeitet. Die Druckqualität hängt von der reprototechnischen Eignung des Originalmanuskriptes ab, das uns vom Autor bzw. von der Forschungsstelle zur Verfügung gestellt wurde.

© by Fraunhofer IRB Verlag

2015

ISBN 978-3-8167-9431-8

Vervielfältigung, auch auszugsweise,
nur mit ausdrücklicher Zustimmung des Verlages.

Fraunhofer IRB Verlag

Fraunhofer-Informationszentrum Raum und Bau

Postfach 80 04 69

70504 Stuttgart

Nobelstraße 12

70569 Stuttgart

Telefon 07 11 9 70 - 25 00

Telefax 07 11 9 70 - 25 08

E-Mail irb@irb.fraunhofer.de

www.baufachinformation.de

www.irb.fraunhofer.de/tauforschung



Abschlussbericht

Strukturoptimierte Türme für Offshore – Windenergieanlagen aus UHFFB in Segmentbauweise

Markus Plank¹, Björn Frettlöhr¹, Jan Quappen²,
Werner Sobek¹

¹ Institut für Leichtbau Entwerfen und Konstruieren (ILEK), Universität Stuttgart

² Stiftung Lehrstuhl Windenergie (SWE), Universität Stuttgart



September 2014



Abschlussbericht

Strukturoptimierte Türme für Offshore – Windenergieanlagen aus UHFFB in Segmentbauweise

Kurztitel: UHFFB - Windenergietürme

Antragsteller: Prof. Dr.-Ing. Dr.-Ing. E.h. Dr. h.c. Werner Sobek
Institut für Leichtbau Entwerfen und Konstruieren (ILEK)
Universität Stuttgart

Projektleiter: Dipl.-Ing. Markus Plank (ILEK) – ab 01.06.2011
Dr.-Ing. Björn Frettlöhr (ILEK) – bis 31.05.2011

Projektbearbeitung: Dipl.-Ing. Markus Plank (ILEK)
Dr.-Ing. Björn Frettlöhr (ILEK)
Dipl.-Ing. Jan Quappen (SWE)

Der Forschungsbericht wurde mit Mitteln der Forschungsinitiative Zukunft Bau des Bundesinstitutes für Bau-, Stadt- und Raumforschung (BBSR) gefördert.

Aktenzeichen: SF – 10.08.18.7- 09.25 / II 2 – F20-09-43

Die Verantwortung für den Inhalt des Berichtes liegt bei den Autoren.

Inhaltsverzeichnis

Bezeichnungen	11
1 Motivation und Zielsetzung	17
1.1 Motivation	17
1.2 Zielsetzung	19
1.3 Inhalt – Überblick und Abgrenzung	20
2 Standortbedingungen und <i>Design Basis</i>	23
2.1 Allgemeines	23
2.2 Standort und Kenndaten der OWEA	23
2.3 Baugrundeigenschaften	26
2.4 Maritime Bedingungen	26
2.5 Windverhältnisse	28
3 Logistikkonzept	29
3.1 Komponenten einer OWEA	29
3.2 Gründungsstrukturen für OWEA	30
3.3 Bauablauf und Rückbau von OWEA	32
3.4 STRABAG Serial System	33
3.4.1 Systemlösung	33
3.4.2 Terminal	33
3.4.3 Installationsschiff	35
3.4.4 Schwerkraftfundament	35
4 Entwurf eines Turmtragwerks aus UHFFB in Segmentbauweise	37
4.1 Vorbemerkung	37
4.2 Anforderungskatalog	37
4.3 Beschreibung des Turmkonzepts	38
4.3.1 Material und Geometrie	38
4.3.2 Vorspannung	41
4.3.3 Fuge	45
5 Versuche zum Materialverhalten von UHFFB	47
5.1 Versuchsprogramm und Bezeichnung der Versuchs- und Probekörper	47
5.2 Versuchs- und Probekörper	48
5.2.1 Betonzusammensetzung und Frischbetoneigenschaften	48

5.2.2	Geometrie der Versuchs- und Probekörper	50
5.2.2.1	Druckversuche und E-Modul-Prüfung	50
5.2.2.2	Biegezugversuche	50
5.2.2.3	Zentrische Zugversuche	50
5.2.3	Herstellung und Lagerung der Versuchs- und Probekörper	51
5.3	Druckversuche und E-Modul-Prüfung	55
5.3.1	Versuchsstand und -durchführung	55
5.3.2	Vorbereitung und Instrumentierung der Probekörper	56
5.3.3	Versuchsergebnisse	56
5.3.3.1	Druckversuche	56
5.3.3.2	E-Modul-Prüfung	61
5.3.3.3	Spannungs-Dehnungs-Beziehung	63
5.4	Biegezugversuche	65
5.4.1	Versuchsstand und -durchführung	65
5.4.2	Vorbereitung und Instrumentierung der Probekörper	66
5.4.2.1	Probekörper ohne Kerbe	66
5.4.2.2	Probekörper mit Kerbe	66
5.4.3	Versuchsergebnisse der Biegezugversuche an Probekörpern ohne Kerbe	67
5.4.4	Versuchsergebnisse der Biegezugversuch an Probekörpern mit Kerbe	73
5.5	Zentrische Zugversuche	76
5.5.1	Versuchsstand und -durchführung	76
5.5.2	Vorbereitung und Instrumentierung der Versuchskörper	78
5.5.2.1	Versuchskörper ohne Kerbe	78
5.5.2.2	Versuchskörper mit Kerbe	80
5.5.3	Versuchsergebnisse der zentrischen Zugversuche an Versuchskörpern ohne Kerbe	82
5.5.3.1	Spannungs-Dehnungs-Beziehung	82
5.5.3.2	Spannungs-Rissöffnungs-Beziehung	95
5.5.4	Versuchsergebnisse der zentrischen Zugversuche an Versuchskörpern mit Kerbe	100
5.5.4.1	Spannungs-Dehnungs-Beziehung	100
5.5.4.2	Spannungs-Rissöffnungs-Beziehung	107
5.5.4.3	Faserorientierungsmessung und Ermittlung der 1D Zugfestigkeit	112
5.6	Zusammenfassung der Versuchsergebnisse	118

6	Bemessungswerte von UHFFB	121
6.1	Teilsicherheitsbeiwerte	121
6.2	Definition der Bemessungswerte von UHFFB	122
6.2.1	Definition der Bemessungswerte für einaxiale Druckbeanspruchung	122
6.2.2	Definition der Bemessungswerte für einaxiale Zugbeanspruchung	125
6.3	Ermüdungsverhalten von UHFFB unter Druckschwellbeanspruchung	128
6.3.1	Allgemeines	128
6.3.2	Wöhlerlinien in Anlehnung an CEB-FIP MC 90 (1993) bzw. CEB-FIP MC 2010 (2010)	128
6.3.3	Wöhlerlinie für UHFFB nach Wefer (2010)	130
6.3.4	Materialparameter für Ermüdungsnachweis von UHFFB	133
6.4	Zeitabhängige Verformungen von UHFFB	134
6.4.1	Schwinden	134
6.4.2	Kriechen	134
7	Maritime Bedingungen und Windverhältnisse	135
7.1	Ergänzende Annahmen zur Design Basis	135
7.2	Standorte und Ausstattung der Messstationen	135
7.3	Auswertung der Messdaten	138
7.3.1	Scatter-Diagramm	138
7.3.2	NSB II	138
7.3.3	Forschungsplattform FINO1	149
7.4	Beurteilung der Scatter-Diagramme	154
8	Auslegung des Turmtragwerks aus UHFFB in Segmentbauweise	155
8.1	Eigenfrequenzanalyse	155
8.1.1	Berechnung der Gründungsfedersteifigkeit	155
8.1.2	Mehrmassenschwingermodell für die Eigenfrequenzanalyse	156
8.1.3	Parameterstudie zur Eigenfrequenz	160
8.1.4	Campbell-Diagramm der Variante A und B	164
8.2	Gesamtdynamische Berechnung	167
8.2.1	Allgemeines	167
8.2.2	Simulationsprogramm Flex 5	168
8.2.3	Modellierung der OWEA mit Flex 5	170
8.2.4	Definition der Lastfälle	177
8.3	Ermittlung der Schnittgrößen	180

8.3.1	Allgemeines	180
8.3.2	Schnittgrößen als Ergebnis der Simulation mit Flex 5	180
8.3.3	Schnittgrößen aus Vorspannung	182
8.3.4	Schnittgrößen aus Temperatur	183
8.3.5	Schnittgrößen aus Imperfektion	184
8.3.6	Auswirkungen nach Theorie II. Ordnung	185
8.4	Ermüdung	186
8.5	Nachweis der Tragstruktur	188
8.5.1	Allgemeines	188
8.5.2	Turmvariante 1	189
8.5.2.1	Dimensionierung der Vorspannkraft	189
8.5.2.2	Grenzzustand der Tragfähigkeit (ULS)	196
8.5.2.3	Grenzzustand der Gebrauchstauglichkeit (SLS)	205
8.5.3	Turmvariante 3	207
8.5.4	Turmvariante 5	211
8.5.5	Vergleich der untersuchten Turmvarianten	214
9	Versuche an Fugen	215
9.1	Allgemeines	215
9.1.1	Lage der Fuge im Bauteil	215
9.1.2	Fugenarten	216
9.2	Übersicht über das Versuchsprogramm zur Ermittlung der Tragfähigkeit von Trockenfugen	216
9.2.1	Zweck der Versuche	216
9.2.2	Geometrie der Versuchskörper und Auswertung der Versuche	217
9.2.3	Versuchsprogramm	220
9.2.4	Fugengeometrie	222
9.2.5	Herstellung und Passgenauigkeit der Fugen	225
10	Versuche zur Tragfähigkeit von Trockenfugen unter statischer Belastung	227
10.1	Versuchsprogramm und Bezeichnung der Versuchs- und Probekörper	227
10.2	Versuchs- und Probekörper	230
10.2.1	Betonzusammensetzung und Frischbetoneigenschaften	230
10.2.2	Geometrie der Versuchs- und Probekörper	231
10.2.2.1	Druckversuche und E-Modul-Prüfung	231
10.2.2.2	Biegezugversuche	231

10.2.2.3	Schub-Druck-Versuche	231
10.2.3	Herstellen und Lagerung der Versuchs- und Probekörper	234
10.3	Druckversuche und E-Modul-Prüfung	239
10.3.1	Versuchsstand und –durchführung	239
10.3.2	Vorbereitung und Instrumentierung der Probekörper	239
10.3.3	Versuchsergebnisse	239
10.3.3.1	Druckversuche	239
10.3.3.2	E-Modul-Prüfung	243
10.4	Biegezugversuche	244
10.4.1	Versuchsstand und –durchführung	244
10.4.2	Vorbereitung und Instrumentierung der Probekörper	244
10.4.3	Versuchsergebnisse	244
10.5	Schub-Druck-Versuche	252
10.5.1	Versuchsstand und –durchführung	252
10.5.2	Vorbereitung und Instrumentierung der Versuchskörper	253
10.5.3	Versuchsergebnisse	255
10.5.3.1	Auswertung der Versuche	255
10.5.3.2	Versuchskörper ohne Fuge (Referenzprismen)	255
10.5.3.3	Versuchskörper mit sehr glatter Fuge	259
10.5.3.4	Versuchskörper mit gestrahlter Fuge	261
10.5.3.5	Versuchskörper mit rauer Fuge	263
10.5.3.6	Versuchskörper mit verzahnter Fuge	266
10.6	Zusammenfassung der Ergebnisse	269
11	Versuche zur Tragfähigkeit von Trockenfugen unter zyklischer Belastung	271
11.1	Versuchsprogramm und Bezeichnung der Versuchs- und Probekörper	271
11.2	Versuchs- und Probekörper	275
11.2.1	Betonzusammensetzung und Frischbetoneigenschaften	275
11.2.2	Geometrie der Versuchs- und Probekörper	275
11.2.2.1	Druckversuche	275
11.2.2.2	Biegezugversuche	275
11.2.2.3	Abscherversuche	276
11.2.3	Herstellen und Lagerung der Versuchs- Probekörper	277
11.3	Druckversuche	282
11.3.1	Versuchsstand und –durchführung	282

11.3.2	Vorbereitung und Instrumentierung der Probekörper	282
11.3.3	Versuchsergebnisse	282
11.4	Biegezugversuche	285
11.4.1	Versuchsstand und –durchführung	285
11.4.2	Vorbereitung und Instrumentierung der Probekörper	285
11.4.3	Versuchsergebnisse	285
11.5	Abscherversuche	293
11.5.1	Versuchsstand und –durchführung	293
11.5.2	Vorbereitung und Instrumentierung der Versuchskörper	296
11.5.3	Versuchsergebnisse unter statischer Belastung	297
11.5.3.1	Auswertung der Versuche	297
11.5.3.2	Ergebnisse für die Versuchskörper mit sehr glatter Fuge	299
11.5.3.3	Ergebnisse für die Versuchskörper mit verzahnter Fuge	305
11.5.4	Versuchsergebnisse unter zyklischer Belastung	313
11.5.4.1	Auswertung der Versuche	313
11.5.4.2	Ergebnisse für die Versuchskörper mit sehr glatter Fuge	314
11.5.4.3	Ergebnisse für die Versuchskörper mit verzahnter Fuge	324
11.6	Zusammenfassung der Ergebnisse	338
12	Zusammenfassung und Ausblick	345
12.1	Zusammenfassung	345
12.2	Schlussfolgerung und Ausblick	350
	Schrifttum	351
	Verzeichnis der Bilder	357
	Verzeichnis der Tabellen	371
Anhang A	Materialverhalten von UHFFB	377
A.1	Druckversuche und E-Modul-Prüfung	380
A.1.1	Charge C1	380
A.1.2	Charge C2	384
A.1.3	Charge C3	388
A.2	Biegezugversuche – Probekörper ohne Kerbe	392
A.2.1	Charge C1	392
A.2.2	Charge C2	396
A.2.3	Charge C3	400

A.3	Biegezugversuche – Probekörper mit Kerbe	404
A.4	Zentrische Zugversuche – Versuchskörper ohne Kerbe	408
A.4.1	Charge C2	408
A.4.2	Charge C3	412
A.5	Zentrische Zugversuche – Versuchskörper mit Kerbe	419
A.5.1	Charge C1	419
A.5.2	Charge C2	423
Anhang B	Schnittgrößen und Ergebnisse der UHFFB Turmvarianten	427
B.1	Turmvariante 1	428
B.1.1	Schnittgrößen	428
B.1.1.1	Schnittgrößen aus der Simulation mit Flex 5 (charakteristische Schnittgrößen)	428
B.1.1.2	Maximum und Minimum aller mit Flex 5 simulierten Lastfälle (charakteristische Schnittgrößen)	436
B.1.1.3	Maximum und Minimum aller mit Flex 5 simulierten Power Production Lastfälle (charakteristische Schnittgrößen)	437
B.1.1.4	Sonstige Schnittgrößen: $M_{LDD99\%}$, M_{temp} , M_{imp} (charakteristische Schnittgrößen)	438
B.1.2	Dimensionierung der Vorspannkraft	439
B.1.2.1	Nachweis der Dekompression	439
B.1.2.2	Begrenzung der Klaffung der Fuge	440
B.1.2.3	Anzahl der Spannglieder	441
B.1.3	Nachweise	442
B.1.3.1	Normalspannungsnachweis (ULS)	442
B.1.3.2	Schubspannungsnachweis (ULS)	444
B.1.3.3	Kraftübertragung in der Fuge (ULS)	449
B.1.3.4	Spannungsbegrenzung (SLS)	453
B.2	Schnittgrößen und Ergebnisse der Turmvariante 3	455
B.2.1	Schnittgrößen	455
B.2.1.1	Schnittgrößen aus der Simulation mit Flex 5 (charakteristische Schnittgrößen)	455
B.2.1.2	Maximum und Minimum aller mit Flex 5 simulierten Lastfälle (charakteristische Schnittgrößen)	463
B.2.1.3	Maximum und Minimum aller mit Flex 5 simulierten Power Production Lastfälle (charakteristische Schnittgrößen)	464
B.2.1.4	Sonstige Schnittgrößen: $M_{LDD99\%}$, M_{temp} , M_{imp} (charakteristische Schnittgrößen)	465

B.2.2	Nachweise	466
B.2.2.1	Normalspannungsnachweis (ULS)	466
B.2.2.2	Schubspannungsnachweis (ULS)	468
B.2.2.3	Kraftübertrag in der Fuge (ULS)	473
B.2.2.4	Spannungsbegrenzung (SLS)	477
B.3	Schnittgrößen und Ergebnisse der Turmvariante 5	479
B.3.1	Schnittgrößen	479
B.3.1.1	Schnittgrößen aus der Simulation mit Flex 5 (charakteristische Schnittgrößen)	479
B.3.1.2	Maximum und Minimum aller mit Flex 5 simulierten Lastfälle (charakteristische Schnittgrößen)	487
B.3.1.3	Maximum und Minimum aller mit Flex 5 simulierten Power Production Lastfälle (charakteristische Schnittgrößen)	488
B.3.1.4	Sonstige Schnittgrößen: $M_{LDD99\%}$, M_{temp} , M_{imp} (charakteristische Schnittgrößen)	489
B.3.2	Nachweise	490
B.3.2.1	Normalspannungsnachweis (ULS)	490
B.3.2.2	Schubspannungsnachweis (ULS)	492
B.3.2.3	Kraftübertragung in der Fuge (ULS)	497
B.3.2.4	Spannungsbegrenzung (SLS)	501
Anhang C	Tragfähigkeit von Trockenfugen unter statischer Belastung	503
C.1	Druckversuche und E-Modul-Prüfung	506
C.1.1	Charge C4	506
C.1.2	Charge C5	510
C.1.3	Charge C6	514
C.1.4	Charge C7	514
C.1.5	Charge C8	515
C.1.6	Charge C9	515
C.1.7	Charge C10	516
C.1.8	Charge C11	516
C.2	Biegezugversuche	517
C.2.1	Charge C4	517
C.2.2	Charge C5	521
C.2.3	Charge C6	525
C.2.4	Charge C7	529

C.2.5	Charge C8	533
C.2.6	Charge C9	537
C.2.7	Charge C10	541
C.2.8	Charge C11	545
C.3	Schub-Druck-Versuche	549
C.3.1	Versuchskörper ohne Fuge (Referenzprismen)	549
C.3.2	Versuchskörper mit sehr glatter Fuge	557
C.3.3	Versuchskörper mit gestrahlter Fuge	563
C.3.4	Versuchskörper mit rauer Fuge	569
C.3.5	Versuchskörper mit verzahnter Fuge	579
Anhang D	Tragfähigkeit von Trockenfugen unter zyklischer Belastung	589
D.1	Druckversuche	593
D.1.1	Charge C12	593
D.1.2	Charge C13	593
D.1.3	Charge C14	594
D.1.4	Charge C15	594
D.1.5	Charge C16	595
D.1.6	Charge C17	595
D.1.7	Charge C18	596
D.1.8	Charge C19	596
D.2	Biegezugversuche	597
D.2.1	Charge C12	597
D.2.2	Charge C13	601
D.2.3	Charge C14	605
D.2.4	Charge C15	609
D.2.5	Charge C16	613
D.2.6	Charge C17	617
D.2.7	Charge C18	621
D.2.8	Charge C19	625
D.3	Abscherversuche unter statischer Belastung	629
D.3.1	Versuchskörper mit sehr glatter Fuge	629
D.3.1.1	SG_S1 (C12 und C13)	629
D.3.1.2	SG_S2 (C14 und C15)	635
D.3.1.3	SG_S3 (C16 und C17)	641

D.3.2	Versuchskörper mit verzahnter Fuge	647
D.3.2.1	V_S1 (C12 und C13)	647
D.3.2.2	V_S2 (C14 und C15)	653
D.3.2.3	V_S3 (C16 und C17)	659
D.3.2.4	V_S4 (C18 und C19)	665
D.4	Abscherversuche unter zyklischer Belastung	673
D.4.1	Versuchskörper mit sehr glatter Fuge	673
D.4.1.1	SG_S1 (C12 und C13)	673
D.4.1.2	SG_S2 (C14 und C15)	683
D.4.1.3	SG_S3 (C16 und C17)	691
D.4.2	Versuchskörper mit verzahnter Fuge	700
D.4.2.1	V_S1 (C12 und C13)	700
D.4.2.2	V_S2 (C14 und C15)	706
D.4.2.3	V_S3 (C16 und C17)	715
D.4.2.4	V_S4 (C18 und C19)	724