

Technische Universität Sofia



**Institut für Technische Thermodynamik
des
Deutsches Zentrums für Luft-und Raumfahrt e.V. (DLR)**

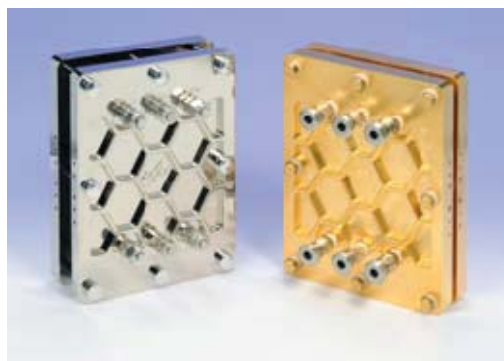


Fachbereich Maschinenbau

Diplomarbeit

Thema:

**„Konstruktion und verformungstechnische Analyse von Endplatten für
einen Leichtbau-Brennstoffzellenstack“**



Betreuer : Dipl.-Ing. Torsten Knöri
Doz. Dr. Evgeni Krajshev

Inhaltsverzeichnis

I. Abbildungsverzeichnis.....	4
II. Tabellenverzeichnis.....	8
III. Verwendete Abkürzungen und Symbole.....	9
1. Einleitung und Übersicht.....	12
1.1 Motivation.....	12
1.2 Problemstellung.....	13
1.3 Zielsetzung der Arbeit.....	13
2. Grundlagen.....	14
2.1 Historische Entwicklung.....	14
2.2 Brennstoffzellenarten.....	15
2.3 Funktionsweise der PEM-Brennstoffzelle.....	16
2.4 Aufbau eines PEM-Brennstoffzellenstapels.....	18
2.5 Vor- und Nachteile gegenüber Verbrennungsmotoren.....	21
2.6 Stand der Technik.....	22
2.6.1 Stand der Technik in der Industrie.....	23
2.6.2 Stand der Technik im DLR.....	25
3. Modellierung und erste Optimierung des aktuellen DLR-Stack.....	27
3.1 Aufgaben der Endplatten des aktuellen DLR-Brennstoffzellenstacks.....	27
3.1.1 Aufbau der aktuellen Endplatten.....	28
3.2 Simulation der aktuellen Endplatte mittels Finite-Elementen-Methode (FEM).....	33
3.2.1 Theorie der Finite-Elemente-Methode: Dünne Platte.....	34
3.2.2 Anmerkungen über das mechanische Verhalten von Schraubenverbindungen.....	40
3.3 Berechnungen der Verformungen des aktuellen DLR-Stacks.....	42
3.3.1 Einfluss der Schraubenanzahl und -anordnung.....	43
3.3.2 Eintritt eines Bruchs der Bipolarplatten beim Verspannen des Stackes.....	52
3.3.3 Berechnung des Temperatureinflusses.....	59
3.4 Erste Optimierung des aktuellen DLR-Stacks.....	61
3.4.1 Variation der Plattendicke.....	61
3.4.2 Variation der Bohrungen für die Schrauben.....	63
4. Weitergehende Optimierung: Entwicklung neuer Endplattenkonzepte.....	68
4.1 Allgemeiner Auslegungsprozess der neuen Konzepte nach VDI.....	68
4.2 Anwendungen des allgemeinen Auslegungsprozesses gemäß VDI für eine Neukonstruktion der Endplatte.....	70
4.2.1 Aufgabenklärung.....	70

Optimierung der Endplatten für einen Leichtbau-Brennstoffzellenstack

4.2.2 Ermitteln von Funktionen und deren Strukturen.....	70
4.2.3 Suchen nach Lösungsprinzipien und deren Strukturen.....	70
4.2.4 Auswahl des Endplatten-Konzepts.....	70
4.2.5 Ausarbeitung des Grundkonzepts für ein neues Endplatten-Design.....	80
4.3 Entwicklung neuer Designs für die Rückseite der Endplatten.....	80
4.3.1 Vorgehensweise	80
4.3.2 Optimierte Strukturen für die Endplatten.....	80
5. Materialauswahl.....	85
5.1 Allgemeines zur Werkstoffauswahl für den Leichtbau der Endplatte	86
5.2 Auswirkungen auf die mechanischen Eigenschaften der Endplatten bei einer Änderung des Materials	86
5.2.1 Allgemeine Eigenschaften.....	86
5.2.2 Probleme durch fehlerhafte Werkstoffauswahl bei den Endplatte.....	88
5.2.3 Vor- und Nachteile des aktuellen Werkstoffs der DLR-Endplatten.....	88
5.3 Vor- und Nachteile möglicher Werkstoffe für die Endplatten.....	89
5.4 Vorläufige Werkstoffauswahl für die Endplatten	93
6. Auswahl der optimalen Endplatten-Variante.....	94
6.1 Kriterien zur Bewertung der unterschiedlichen Endplatten-Designs.....	94
6.2 Erfüllung der Anforderungen	97
7. Zusammenfassung und Ausblick.....	98
IV Anhang.....	100

I. Abbildungsverzeichnis

Abb. 2-1: Christian Friedrich Schönbein (1799 bis 1868)	14
Quelle: Peter Kurzweil, Brennstoffzellentechnik	
Abb. 2-2: Sir William R. Grove (1811 bis 1896).....	14
Quelle: Dr. Heinrich Lienkamp, Infraserb Höchst, Geschäftsfeld Energien	
Abb. 2-3: Brennstoffzellenstack	15
Quelle: Mark 3 der Firma Ballard Power Systems Inc.	
Abb. 2-4: Schematische Darstellung der Funktionsweise einer PEMFC-Brennstoffzelle	16
Quelle: Wokaun, Alexander; Erneuerbare Energien	
Abb. 2-5: Kennlinien einer PEMFC Brennstoffzelle.....	18
Quelle: DLR	
Abb. 2-6: Prinzipieller Aufbau eines Zellstapels	19
Quelle: Martin Dieter Ruge	
Abb. 2-7: Aufbau eines Brennstoffzellestacks im DLR.....	20
Quelle: DLR	
Abb. 2-8: Wirkungsgradvergleich zwischen Verbrennungsmotor und Brennstoffzelle	21
Quelle: Martin Dieter Ruge	
Abb. 2.9: Hausenergieversorgung mit PEM- oder SOFC-Brennstoffzellen	22
Quelle: Wokaun, Alexander; Erneuerbare Energien	
Abb. 2-10: 200 KW PAFC-Anlage (ONSI)	23
Abb. 2-11: 200 KW MFCF Hot Module (MTU)	23
Abb. 2-12: 220 KW SOFC-Anlage mit Gasturbine (Siemens Westinghouse)	23
Abb. 2-13: Brennstoffzellen-APU im Kofferraum eines 7-er H2 BMW	24
Abb. 2-14: Nebus (250 kW H2 BZ-System. DaimlerChrysler	24
Abb. 2-15: Mercedes-Benz B-Klasse F-CELL (100 kW).....	24
Abb. 2-16: Antares DLR-H2	26
Abb. 3-1: Schematischen Aufbaus des DLR-Stacks (Medienzufuhr über eine Endplatte)	28

Optimierung der Endplatten für einen Leichtbau-Brennstoffzellenstack

Abb. 3-3: Aufbau der aktuellen Endplatte des DLR-Stacks (Innenseite)..	29
Abb. 3-4: Aktuelle Endplatte (Links: Vordere Endplatte, rechts: Hintere Endplatte)	30
Abb. 3-5: Schraube M8 (Qualität NBN A2-70)	31
Abb. 3-6: Schrauben für Fixierung der Endplatte	31
Abb. 3-7: Ausschnitt der vorderen Endplatte	31
Abb. 3-8: Aufbau der Dichtungen für den Kühlkreislauf (links) und die Gasräume (rechts)..	32
Abb. 3-9: Einordnung der Computermechanik in die Geschichte der Mechanik	33
Abb. 3-10: Platte	34
Abb. 3-11: Durchbiegung der Platte	35
Abb. 3-12: Verschiebung v in X Richtung	36
Abb. 3-13: Spannungsverlauf in der Platte	37
Abb. 3-14: Schnittkräfte an der dünnen Platte (Quelle) FEM FDIBA Vorlesung	39
Abb. 3-18: Spannungsverteilung in der Schrauben-Mutter- Verbindung, nach Schneider	40
Abb. 3-19: Kraftfeld einer normal axial durch Vor- Spannung beanspruchten Schraube mit Mutter, nach Wyss	41
Abb. 3-20: Kraftfeld beim Schraubengewinde im freien Teil, nach Wyss	41
Abb. 3-21: Spannungsverteilung in der mit und ohne zusätzliche Biegung belastete Modellgewindeverbindung M60 x 100, nach Kloos und Schneider	42
Abb. 3-22: Kräftegleichgewicht an der Endplatte	42
Abb. 3-23: Endplatte mit 4 Schrauben in Rechteckanordnung	44
Abb. 3-24: Endplatte mit 4 Schrauben in Kreuzanordnung	45
Abb. 3-25: Endplatte mit 6 Schrauben entlang der längeren Seite	45
Abb. 3-26: Endplatte mit 8 Schrauben	45
Abb. 3-27: Ergebnisse der Simulationen mit verschiedenen Schraubenanordnungen bei	

Optimierung der Endplatten für einen Leichtbau-Brennstoffzellenstack

einem Anzugsmoment von 4,5 Nm (4 Schrauben in Rechteckanordnung (o.l.), 4 Schrauben in Kreuzanordnung (o.r.), 6 Schrauben (u.l.), 8 Schrauben(u.r.).....	47
Abb. 3-28: Maximale Verschiebungen an der hinteren Endplatte bei unterschiedlichen Schraubenanordnungen in mm (MN = 4,5 Nm).....	48
Abb. 3-29: Ergebnisse der Simulationen mit verschiedenen Schraubenanordnungen bei einem Anzugsmoment von 4,5 Nm (4 Schrauben in Rechteckanordnung (o.l.), (4 Schrauben in Kreuzanordnung (o.r.), 6 Schrauben (u.l.), 8 Schrauben(u.r.) ...	49
Abb. 3-30: Maximale Verschiebungen an der vorderen Endplatte bei unterschiedlichen Schraubenanordnungen in mm (MN = 4,5 Nm).....	50
Abb. 3-31: Spannungsanalyse für die Baugruppe Vordere Endplatte-Bipolarplatte bei einer Montage über vier Schrauben in Kreuzanordnung (links); Spannungsverteilung in der Bipolarplatte (rechts) (MN = 4,5 Nm).....	51
Abb. 3-32: Einbau der drucksensitiven Folie in den Brennstoffzellenstack	51
Abb. 3-33: Druckverteilung bei einem Vorspannmoment von 5,5 (links) und 4,5 Nm (rech.....	52
Abb. 3-34: Ausbildung eines Scherbruchs durch die Verbindung von Griffith Mikrorissen..	52
Abb. 3-35: Wirkflächen von Bipolarplatte und Endplatte	53
Abb. 3-35: Spannungsverlauf bei der Bipolarplatte beim Bruch	53
Abb. 3-36: Detailausschnitte beim Bruch der Bipolarplatte	55
Abb. 3-37: Ergebnisse der Simulationen mit verschiedenen Schraubenanordnungen bei einer kritischen Vorspannkraft von $1,01 \cdot 10^6$ N N (4 Schrauben in Rechteckanordnung (o.l.), 4 Schrauben in Kreuzanordnung (o.r.), 6 Schrauben (u.l.), 8 Schrauben(u.r.)	57
Abb. 3-38: Maximale Verschiebungen an der vord. Endplatte beim Bruch der Bipolarplatten für unterschiedliche Schraubenanordnungen in mm (FStack,T = $3,15 \cdot 10^5$ N).....	57
Abb. 3-39: Ergebnisse der Simulationen mit verschiedenen Schraubenanordnungen bei einer kritischen Vorspannkraft von $1,01 \cdot 10^6$ N (4 Schrauben in Rechteckanordnung (o.l.), 4 Schrauben in	

Optimierung der Endplatten für einen Leichtbau-Brennstoffzellenstack

Kreuzanordnung (o.r.), 6 Schrauben (u.l.), 8 Schrauben(u.r.)	58
Abb. 3-40: Maximale Verschiebungen an der hint. Endplatte beim Bruch der Bipolarplatten für unterschiedliche Schraubenanordnungen in mm (FStack,T = 1,01· 106 N).....	60
Abb. 3-41: Änderung der Gewindelänge durch den Einfluss der Temperatur.....	62
Abb. 3-42: Maximale Verschiebungen an der hinteren Endplatte bei unterschiedlichen Schraubenanordnungen und Plattendicken in mm (MN = 4,5 Nm).....	62
Abb. 3-43: Die Verschiebung der Platte bei einer Optimalen Dicke 10 mm	62
Abb. 3-44: Maximale Verschiebungen an der hinteren Endplatte bei unterschiedlicher Schraubenposition und –anzahl in mm (MN = 4,5 Nm; Plattendicke 25 mm)	63
Abb. 3-45: Verformungen hinteren Endplatte mit der Schraubenanordnung 25x50 (Dicke: 25 mm)	64
Abb. 3-46: Verformungen bei einer hinteren Endplatte mit der Schraubenanordnung 20x20. (Dicke: 25 mm)	65
Abb. 3-47: Maximale Verschiebungen an der hinteren Endplatte bei unterschiedlicher Schraubenposition und –anzahl in mm (MN = 4,5 Nm; Plattendicke 12,5 mm)	66
Abb. 3-48: Verformungen bei einer hinteren Endplatte mit der Schraubenanordnung 20x20 (Dicke: 12,5 mm)	66
Abb. 4-1: Das Vorgehen bei der Konstruktion neuer technischer Produkte in Anlehnung an die VDI – Richtlinie 222.....	69
Abb. 4-2: Konzept für die Einspannvorrichtung.....	71
Abb. 4-3: Höhe und Breite der aktuelle Endplatte	73
Abb. 4-4: Abgerundete Ecken der Endplatte als Beispiel der Formgestaltung.....	77
Abb. 4-5: Verteilerstrukturen in der Bipolarplatte (links) und in der Ausgangskonstruktion für das neue Endplattendesign (rechts)	78
Abb. 4-6: Entfernung von Material mithilfe von Ansys-Algorithmen.....	79
Abb. 4-7: Fachwerkkonzept und dessen Verformung unter Belastung (v.l.n.r.)	80

Optimierung der Endplatten für einen Leichtbau-Brennstoffzellenstack

Abb. 4-8: Erstes Rippenkonzept und dessen Verformung unter Belastung (v.l.n.r.).....	81
Abb. 4-9: Zweites Rippenkonzept und dessen Verformung unter Belastung (v.l.n.r.).....	81
Abb. 4-10:Optimiertes Rippenkonzept und dessen Verformung unter Belastung (v.l.n.r.).....	81
Abb. 4-11: Trapezkonzept und dessen Verformung unter Belastung (v.l.n.r.).....	82
Abb. 4-12: Optimiertes Trapezkonzept und dessen Verformung unter Belastung (v.l.n.r.)	82
Abb. 4-13: Konzept der massiven Platte und dessen Verformung unter Belastung (v.l.n.r.) ..	83
Abb. 4-14: Ober- und Unterseite der Endplatte nach dem Pyramiden-Konzept und deren Verformung unter Belastung (v.l.n.r.).....	83
Abb. 5-1: Einflussgrößen bei der Materialauswahl.....	85
Abb. 5-2: Spannungs-Dehnungs-Diagramm unterschiedlicher Kunststoffe.....	87
Abb. 5-3: Unterschiedliche Kohlefasergewebe und –geflechte	92
Abb. 6-3: Die optimale Endplatte: Sechskant-Rippen-Design.....	96
Abb. 6-4: Zweitbestes Endplattenkonzept: Trapez-Design.....	97

II. Tabellenverzeichnis

Tab. 2-1: Vergleich der verschiedenen Brennstoffzellentypen	16
Tab. 3-1: Maximale Verschiebungen an der hinteren Endplatte bei unterschiedlichen Schraubenanordnungen in mm ($M_N = 4,5 \text{ Nm}$)	48
Tab. 3-2: Maximale Verschiebungen an der vorderen Endplatte bei unterschiedlichen Schraubenanordnungen in mm ($M_N = 4,5 \text{ Nm}$).....	50
Tab. 3-3: Maximale Verschiebungen an der vorderen Endplatte beim Bruch der Bipolarplatte bei unterschiedlichen Schraubenanordnungen in mm ($F_{\text{Stack,T}} = 1,01 \cdot 10^6$).....	56
Tab. 3-4: Maximale Verschiebungen an der hinteren Endplatte beim Bruch der Bipolarplatte bei unterschiedlichen Schraubenanordnungen in mm ($F_{\text{Stack,T}} = 1,01 \cdot 10^6 \text{ N}$).....	58
Tab. 3-5: Längenänderung durch die Wärmedehnung bei unterschiedlichen	

Optimierung der Endplatten für einen Leichtbau-Brennstoffzellenstack

Stacklängen für eine Temperaturänderung von $\Delta T = 180\text{ °C} - 20\text{ °C} = 160\text{ °C}$	60
Tab. 3-6: Maximale Verschiebungen an der hinteren Endplatte bei unterschiedlichen Schraubenanordnungen und Plattendicken in mm ($M_N = 4,5\text{ Nm}$)	62
Tab. 3-7: Maximale Verschiebungen an der hinteren Endplatte bei unterschiedlicher Schraubenposition und -anzahl in mm ($M_N = 4,5\text{ Nm}$).....	64
Tab. 4-1: Vorteile und Nachteile der verschiedenen Endplattenkonzepte	73
Tab. 4-2: Materialkennwerte des Stahls 1.4435 (X2CrNiMo 18-14-3)	78
Tab. 5-1: Auswirkungen und Ursachen einer fehlerhaften Werkstoffauswahl	88
Tab. 5-2: Eigenschaften unterschiedlicher Edelstähle	89
Tab. 6-1: Kriterien zur Auswahl des optimalen Endplatten-Designs.....	94
Tab. 6-2: Auswahl der Endplatte (Fortsetzung)	95
Tab. 6-3: Erfüllung der Anforderungen bei den beiden besten Endplattenkonzepten	97

III. Verwendete Abkürzung und Symbole

Symbol	Erklärung	Einheit
BZ	Brennstoffzellen	-
CAD	Computer Aided Design	-
FMEA	Fehlermöglichkeiten-Einfluss Analyse	-
FEM	Finite Elemente Methode	-
AFC	Alkalische Brennstoffzelle	-
PEFC	Polymerelektrolyt - Membran - Brennstoffzelle	-
PAFC	Phosphorsäure - Brennstoffzelle	-
MCFC	Karbonatschmelze - Brennstoffzell	-
SOFC	Oxidkeramische - Brennstoffzelle	-
DMFC	Direkt - Methanol - Brennstoffzelle	-
DLR	Institut des deutsches Luft und Raumfahrt	-
T	Temperatur	(°C)
Z	Oberfläche	(m ²)