

## Inhaltsverzeichnis

<b>1 Einleitung .....</b>	<b>15</b>
<b>2 Ausgangssituation (Stand der Technik).....</b>	<b>17</b>
2.1 Emissionen des Straßenverkehrs .....	19
2.1.1 Entwicklung von PKW-Bestand, Verbrauch, Fahrleistungen .....	19
2.1.2 Schadstoffemissionen und deren Grenzwerte.....	21
2.1.3 CO <sub>2</sub> -Emissionen .....	27
2.1.4 Umweltpolitische Ziele in Europa und Deutschland.....	28
2.2 Funktionsweise der Brennstoffzelle.....	30
2.2.1 Verschiedene Typen von Brennstoffzellen .....	32
2.2.2 Funktionsweise und Aufbau der PEM-Brennstoffzelle.....	33
2.2.3 Charakteristische Merkmale von PEM-Brennstoffzellen.....	35
2.2.4 Vergleich von PEM-Brennstoffzellen verschiedener Hersteller .....	40
2.3 Die Brennstoffzelle als Fahrzeugantrieb .....	42
2.3.1 Existierende Prototypen und veröffentlichte Daten.....	44
2.3.2 Vergleich mit Batteriefahrzeugen.....	47
2.3.3 Vorteile der Brennstoffzelle als Fahrzeugantrieb.....	49
2.4 Kraftstoffspeicherung im Fahrzeug .....	50
2.4.1 Energiedichte verschiedener Kraftstoffe.....	51
2.4.2 Wasserstoffspeicher (gasförmig, flüssig, chemisch gebunden).....	53
2.4.3 Energiedichte verschiedener Wasserstoffspeicher .....	58
2.4.4 Sicherheitsrelevante Eigenschaften von Wasserstoff .....	61
2.4.5 Bewertung von Wasserstoffspeichern und Forschungsschwerpunkte ....	65
2.5 Erhoffte Umweltentlastung durch die Brennstoffzellentechnik .....	68
<b>3 Entwicklung eines BZ-Systems für einen Fahrzeugantrieb.....</b>	<b>71</b>
3.1 Unterscheidung BZ, BZ-Stack, BZ-System, BZ-Antrieb.....	71
3.2 Aufbau des BZ-Stacks .....	74
3.2.1 Notwendige Betriebsbedingungen des PEM BZ-Stacks.....	80
3.2.2 Technische Daten des BZ-Stacks .....	84
3.3 Zielkonflikte bei der Entwicklung eines BZ-Antriebs.....	88

3.3.1	Mögliche Betriebsstrategien .....	91
3.3.2	Systemvereinfachungen .....	93
3.3.3	Festlegung der Betriebsstrategie .....	94
3.4	Berechnungen zur stationären Auslegung des BZ-Systems .....	95
3.4.1	Festlegung der Basisparameter des BZ-Stacks .....	96
3.4.2	Dimensionierung des LH <sub>2</sub> -Tankes .....	99
3.4.3	Berechnung des Luftmassenstromes und der Luftfeuchte als f(t,p) .....	102
3.4.4	Schematische Darstellung des Luftsystems .....	107
3.4.5	Wasserhaushalt des BZ-Fahrzeugs .....	107
3.4.6	Auslegung der Kühlkreisläufe .....	110
3.5	Funktionsweise des BZ-Antriebs .....	115
3.5.1	Starten des BZ-Antriebs .....	115
3.5.2	Betrieb des BZ-Antriebs .....	117
3.5.3	Herunterfahren des BZ-Antriebs .....	121
3.5.4	Grenzen des entworfenen BZ-Antriebs .....	122
3.6	Konsequenzen der Systemvereinfachungen .....	124
<b>4</b>	<b>Meß- / Simulationsergebnisse BZ-Stack, BZ-System, BZ-Antrieb. 125</b>	
4.1	Meßergebnisse des BZ-Stacks .....	125
4.1.1	Stromspannungskurve U / I und Stromwirkungsgradkurve $\eta$ / I .....	128
4.1.2	Leistung des BZ-Stacks abhängig vom Betriebsdruck .....	131
4.1.3	Kühlbedarf / Verlustwärme des BZ-Stacks .....	132
4.2	Meßergebnisse des elektrischen Luftkompressors .....	134
4.3	Meßergebnisse des BZ-Systems .....	137
4.3.1	Temperaturabhängigkeiten und Warmlaufverhalten .....	137
4.3.2	Akustik des BZ-Systems .....	139
4.3.3	Betriebszustand IDLE .....	142
4.3.4	Lastsprünge mit BZ-Stack und BZ-System .....	144
4.4	Wirkungsgrad von BZ-Stack, BZ-System, BZ-Antrieb .....	146
4.5	Verbrauch und Wirkungsgrad im NEDC - „tank-to-wheel“ .....	152
4.5.1	Aufbau des Simulationsmodells für das BZ-Fahrzeug .....	154
4.5.2	Leistungsbedarf eines Fahrzeugs - Reduktionsmöglichkeiten .....	161
4.5.3	Unterscheidung Verbrauch und Wirkungsgrad .....	163

4.5.4	Vergleich der erzielten Wirkungsgrade / Verbräuche im NEDC .....	164
4.5.5	Mehrverbrauch durch Mehrgewicht im NEDC .....	169
4.5.6	Diskussion der Wirkungsgrade und absoluten Verbräuche im NEDC ...	172
4.6	Theoretische Reichweite des BZ-Fahrzeugs .....	175
<b>5</b>	<b>Der BZ-Antrieb im Vergleich zur Verbrennungskraftmaschine ..... 177</b>	
5.1	Entstehungsprozeß H <sub>2</sub> und fossile Kraftstoffe - „well-to-tank“ .....	179
5.2	Primärenergieverbrauch, Energiebilanz „well to wheel“ .....	185
5.3	Energiekosten des BZ-Fahrzeugs .....	190
5.4	Energiekosten Diesel- und Ottomotor .....	193
5.5	Potential des Brennstoffzellenantriebs .....	196
5.6	Potential des Verbrennungsmotors .....	201
5.7	Komplexitäts- und Gewichtsvergleich Ottomotor / BZ-Antrieb .....	205
5.8	Tatsächliche Umweltentlastung durch den Brennstoffzellenantrieb .....	207
5.8.1	Problematik der Kraftstoffspeicherung im Fahrzeug .....	209
5.8.2	Problematik des Primärenergieverbrauchs .....	210
5.9	Einsatzmöglichkeiten / Vermarktungsfähigkeit des BZ-Fahrzeugs .....	213
<b>6</b>	<b>Notwendige Entwicklungen zur Einführung des BZ-Antriebs ..... 217</b>	
6.1	Technische Herausforderungen .....	218
6.2	Infrastruktur .....	224
6.3	Umweltbedingte Randbedingungen .....	226
6.4	Politische Randbedingungen .....	228
6.5	Kosten .....	229
<b>7</b>	<b>Zusammenfassung und Ausblick ..... 234</b>	
<b>8</b>	<b>Literaturverzeichnis ..... 237</b>	
<b>9</b>	<b>Anhang ..... 244</b>	