

Übersicht

1	Einleitung	1
1.1	Motivation und Problemstellung	1
1.2	Stand der Forschung und Technik	5
1.3	Herausforderungen und Zielsetzung	9
1.4	Vorgehensweise	10
2	Energiebordnetze und Spannungsstabilität	11
2.1	Automobile Bordnetze	11
2.2	Spannungsverhalten und Spannungsstabilität	16
2.3	Leistungskritische Zustände	18
2.4	Maßnahmen zur Spannungsstabilisierung	21
3	Bordnetzprüfstand	29
3.1	Anforderungen	30
3.2	Vergleich und Abgrenzung von anderen Prüfständen	30
3.3	Konzeption und Aufbau	31
3.4	Komponenten	33
3.5	Messtechnik	40
3.6	Steuerung	41
3.7	Umweltdaten	42
3.8	Zusammenfassung und Einsatzmöglichkeiten	44
4	Systementwurf	45
4.1	Systemische Anforderungen	45
4.2	Das Bordnetz aus dem Blick der Kybernetik	46
4.3	Prinzipien und Methoden des kybernetischen Systementwurfs	47
4.4	Systemstruktur	51
5	Umweltkoppelung und Prädiktion	55
5.1	Anforderungen an die Prädiktion	55
5.2	Prädiktionsverfahren und -methoden	56
5.3	Theorie der linearen partiellen Information	59
5.4	Umweltkoppelung	62
5.5	Szenarienerkennung	65
5.6	Implementierung und praktische Versuche	70
5.7	Zusammenfassung	74

6 Leistungsmanagement	77
6.1 Modellierung und Abstrahierung	77
6.2 Lokale Managementfunktionen	82
6.3 Betriebsstrategie	104
6.4 Koordinierende Managementfunktionen	105
6.5 Zusammenfassung	112
7 Implementierung und experimentelle Untersuchungen	113
7.1 Implementiertes System	113
7.2 Funktionsnachweis	114
7.3 Parametervariationen und Systemgrenzen	119
7.4 Zusammenfassung Implementierung	122
8 Zusammenfassung und Ausblick	123
8.1 Ergebnis dieser Arbeit	123
8.2 Ausweitung des Anwendungsbereichs	125
8.3 Weiterentwicklungsmöglichkeiten	126
A Berechnung stabilisierender Maßnahmen	127
A.1 Bordnetzspannungen	127
A.2 Modellierung der Batterie	128
A.3 Umrechnung von Leistungen und Spannungen	129
B Sensitivitätsanalyse der Bordnetzspannung	131
B.1 Kenngrößen der Batterie	131
B.2 Kenngrößen des Gleichstromstellers	132
C Vergleich spannungsstabilisierender Maßnahmen	139
D Generische Fahrzeugtypen	141
D.1 Modelle	141
D.2 Ausstattungsmerkmale	143
E Beispiele für leistungskritische Fahrsituationen	145
F Lastmodule am Bordnetzprüfstand	147
G Klassifikationsmerkmale für Bordnetzverbraucher	149
Liste eigener Veröffentlichungen	151
Liste betreuter Arbeiten	153
Literaturverzeichnis	157

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
1.1	Motivation und Problemstellung	1
1.1.1	Entwicklung von Energiebordnetzen und Stabilitätsproblemen . .	1
1.1.2	Gegenwärtiger Zustand	2
1.1.3	Prognose für die Zukunft	3
1.1.4	Lösungsansätze	3
1.2	Stand der Forschung und Technik	5
1.2.1	Fahrzeugtechnik	5
1.2.2	Andere Anwendungsgebiete	7
1.3	Herausforderungen und Zielsetzung	9
1.4	Vorgehensweise	10
2	Energiebordnetze und Spannungsstabilität	11
2.1	Automobile Bordnetze	11
2.1.1	Architektur, Kabelbaum und Masserückleitung	11
2.1.2	Elektrische Energieverbraucher	12
2.1.3	Elektrische Energieerzeuger	15
2.1.4	Energiespeicher	16
2.1.5	Elektrische Energiewandler	16
2.2	Spannungsverhalten und Spannungsstabilität	16
2.3	Leistungskritische Zustände	18
2.3.1	Fahrsituationen	19
2.3.2	Umweltszenarien	20
2.3.3	Beispiele	20
2.4	Maßnahmen zur Spannungsstabilisierung	21
2.4.1	Leistungserhöhung des Generators	21
2.4.2	Unterstützung aus anderen Bordnetzen	23
2.4.3	Entzerrung von Leistungsspitzen	24
2.4.4	Freisetzung von Leistungsreserven der Verbraucher	24
2.4.5	Implementierung zusätzlicher Komponenten	26
2.4.6	Kombination der Maßnahmen und Zusammenfassung	28
3	Bordnetzprüfstand	29
3.1	Anforderungen	30
3.2	Vergleich und Abgrenzung von anderen Prüfständen	30
3.3	Konzeption und Aufbau	31

3.4	Komponenten	33
3.4.1	Kabelbaum und Karosserie	33
3.4.2	Batterien	34
3.4.3	Doppelschichtkondensatoren	37
3.4.4	Verbraucher	37
3.4.5	Generator	38
3.4.6	Gleichstromsteller	39
3.4.7	Echtzeitsysteme	39
3.4.8	Spannungsversorgung der Komponenten	39
3.5	Messtechnik	40
3.5.1	Hardware	40
3.5.2	Software	40
3.6	Steuerung	41
3.6.1	Hardware	41
3.6.2	Software	41
3.7	Umweltdaten	42
3.8	Zusammenfassung und Einsatzmöglichkeiten	44
4	Systementwurf	45
4.1	Systemische Anforderungen	45
4.2	Das Bordnetz aus dem Blick der Kybernetik	46
4.3	Prinzipien und Methoden des kybernetischen Systementwurfs	47
4.3.1	Trennung von Funktion und Management	48
4.3.2	Komplexitätsreduktion durch Hierarchisierung und Dezentralisierung	48
4.3.3	Subsidiarität und Autonomie	49
4.3.4	Rekursive Definition	49
4.3.5	Komplexitätsreduktion durch Beachtung systemischer Grenzen	50
4.3.6	Umweltkoppelung und Prädiktion	50
4.3.7	Weiche Modellierung	51
4.4	Systemstruktur	51
5	Umweltkoppelung und Prädiktion	55
5.1	Anforderungen an die Prädiktion	55
5.2	Prädiktionsverfahren und -methoden	56
5.2.1	Analytische Verfahren	56
5.2.2	Modellbasierte Verfahren	57
5.2.3	Empirische Schätzverfahren	57
5.2.4	Wahrscheinlichkeitsbasierte Zustandsmodelle	58
5.2.5	Bewertung und übernommene Methoden	58
5.3	Theorie der linearen partiellen Information	59
5.4	Umweltkoppelung	62

5.4.1	Eingangsdaten und Normierung	62
5.4.2	Sensordatenfusion	63
5.4.3	Zusammenfassung Umweltkoppelung	65
5.5	Szenarienerkennung	65
5.5.1	Situationsauswahl	67
5.5.2	Szenarienspezifikation	68
5.5.3	Ausgangsdaten	69
5.6	Implementierung und praktische Versuche	70
5.6.1	Umfang von Umweltkoppelung und Szenarienerkennung	70
5.6.2	Ergebnisse	71
5.7	Zusammenfassung	74
6	Leistungsmanagement	77
6.1	Modellierung und Abstrahierung	77
6.1.1	Kybernetische Objekte	78
6.1.2	Kybernetisches Bordnetz	80
6.1.3	Zusammenfassung Modellierung und Abstrahierung	81
6.2	Lokale Managementfunktionen	82
6.2.1	Aufgaben, Methoden und Wissen a priori	84
6.2.2	Realisierung der Feedforward-Steuerung für Verbraucher	87
6.2.3	Robustheit, Stabilität und Linearität der Steuerung	92
6.2.4	Erweiterung auf Erzeuger	97
6.2.5	Erweiterung auf Wandler	101
6.2.6	Erweiterung auf Energiespeicher	101
6.2.7	Erweiterung auf Teilbordnetze	102
6.2.8	Zusammenfassung der lokalen Managementfunktionen	103
6.3	Betriebsstrategie	104
6.4	Koordinierende Managementfunktionen	105
6.4.1	Überblick über die Lenkungsebene	105
6.4.2	Wahl der Führungsgröße	107
6.4.3	Funktionen der Lenkungsebene	107
6.4.4	Rekursivität	111
6.5	Zusammenfassung	112
7	Implementierung und experimentelle Untersuchungen	113
7.1	Implementiertes System	113
7.1.1	Umfang	113
7.1.2	Kommunikation	114
7.1.3	Abweichungen von der Theorie	114
7.2	Funktionsnachweis	114
7.3	Parametervariationen und Systemgrenzen	119
7.3.1	Prädiktionsvariablen	119

7.3.2	Ausstattungsgrad	120
7.3.3	Spannungsstabilisierende Maßnahmen	121
7.4	Zusammenfassung Implementierung	122
8	Zusammenfassung und Ausblick	123
8.1	Ergebnis dieser Arbeit	123
8.2	Ausweitung des Anwendungsbereichs	125
8.3	Weiterentwicklungsmöglichkeiten	126
A	Berechnung stabilisierender Maßnahmen	127
A.1	Bordnetzspannungen	127
A.2	Modellierung der Batterie	128
A.3	Umrechnung von Leistungen und Spannungen	129
B	Sensitivitätsanalyse der Bordnetzspannung	131
B.1	Kenngößen der Batterie	131
B.2	Kenngößen des Gleichstromstellers	132
C	Vergleich spannungsstabilisierender Maßnahmen	139
D	Generische Fahrzeugtypen	141
D.1	Modelle	141
D.1.1	Kleinstwagen	141
D.1.2	Kleinwagen	141
D.1.3	Mittelklasse	142
D.1.4	Oberklasse	142
D.2	Ausstattungsmerkmale	143
D.2.1	Kleinstwagen	143
D.2.2	Kleinwagen	143
D.2.3	Mittelklasse	143
D.2.4	Oberklasse	143
E	Beispiele für leistungskritische Fahrsituationen	145
F	Lastmodule am Bordnetzprüfstand	147
G	Klassifikationsmerkmale für Bordnetzverbraucher	149
	Liste eigener Veröffentlichungen	151
	Liste betreuter Arbeiten	153
	Literaturverzeichnis	157