

# Inhaltsverzeichnis

|          |                                                          |          |
|----------|----------------------------------------------------------|----------|
| <b>1</b> | <b>Einleitung</b>                                        | <b>1</b> |
| 1.1      | Bereits veröffentlichte Resultate . . . . .              | 3        |
| 1.2      | Mathematische Notation und Konventionen . . . . .        | 3        |
| <b>2</b> | <b>Modellierung von Energieversorgungsnetzen</b>         | <b>5</b> |
| 2.1      | Elektrotechnische Einleitung . . . . .                   | 5        |
| 2.1.1    | Das Konzept der Leistung . . . . .                       | 5        |
| 2.1.1.1  | Wirkleistung . . . . .                                   | 7        |
| 2.1.1.2  | Scheinleistung und Blindleistung . . . . .               | 8        |
| 2.1.1.3  | Leistungsdefinition mit Hilfe komplexer Zahlen . . . . . | 9        |
| 2.1.2    | Komplexer Widerstand und Leitwert . . . . .              | 10       |
| 2.2      | Leitungen . . . . .                                      | 11       |
| 2.2.1    | Die Wellengleichung . . . . .                            | 11       |
| 2.2.2    | Das II-Modell . . . . .                                  | 15       |
| 2.2.3    | Die Lastflussgleichungen . . . . .                       | 17       |
| 2.3      | Leistungsschalter . . . . .                              | 19       |
| 2.4      | Generatoren . . . . .                                    | 20       |
| 2.4.1    | Rotordynamik . . . . .                                   | 20       |
| 2.4.2    | Elektrisches Modell des Generators . . . . .             | 22       |
| 2.4.3    | Kombiniertes Generatormodell . . . . .                   | 24       |
| 2.5      | Lasten . . . . .                                         | 25       |
| 2.6      | Das klassische DAE Netzmodell . . . . .                  | 26       |
| 2.6.1    | Das nichtlineare Netzmodell . . . . .                    | 26       |
| 2.6.2    | Das linearisierte Netzmodell . . . . .                   | 31       |
| 2.7      | Erweitertes lineares Netzmodell . . . . .                | 34       |
| 2.8      | Zusammenfassung . . . . .                                | 38       |

|          |                                                                                            |            |
|----------|--------------------------------------------------------------------------------------------|------------|
| <b>3</b> | <b>Stabilität von Energieversorgungsnetzen</b>                                             | <b>39</b>  |
| 3.1      | Allgemeiner Stabilitätsbegriff und Gliederung . . . . .                                    | 39         |
| 3.1.1    | Spannungsstabilität . . . . .                                                              | 41         |
| 3.1.2    | Rotorwinkelstabilität . . . . .                                                            | 45         |
| 3.1.3    | Frequenzstabilität . . . . .                                                               | 47         |
| 3.2      | Zusammenfassung und Motivation des weiteren Vorgehens . . . . .                            | 54         |
| <b>4</b> | <b>Analyse der DAE-Netzmodelle</b>                                                         | <b>57</b>  |
| 4.1      | Lösbarkeit . . . . .                                                                       | 57         |
| 4.1.1    | Eindeutige Lösbarkeit linearer DAEs . . . . .                                              | 58         |
| 4.1.2    | Gewichtete Laplace-Matrizen und zugehörige Graphen . . . . .                               | 61         |
| 4.1.3    | Lösbarkeit der linearen Netz-DAEs . . . . .                                                | 71         |
| 4.1.4    | Anwendung der Lösbarkeitsbedingung in der Praxis . . . . .                                 | 75         |
| 4.2      | Numerische Lösbarkeit . . . . .                                                            | 77         |
| 4.2.1    | Differentiationsindex der linearen Netz-DAEs . . . . .                                     | 78         |
| 4.2.2    | Differentiationsindex für eine vereinfachte nichtlineare Version der Netzmodelle . . . . . | 79         |
| 4.3      | Stabilitätsanalyse . . . . .                                                               | 81         |
| 4.3.1    | Stabilität linearer DAEs . . . . .                                                         | 81         |
| 4.3.2    | Stabilität der Generatorgleichungen . . . . .                                              | 84         |
| 4.3.3    | Stabilität der Netz-DAEs . . . . .                                                         | 85         |
| 4.4      | Zusammenfassung . . . . .                                                                  | 91         |
| <b>5</b> | <b>Einfluss von Schaltungen auf die Netz-DAEs</b>                                          | <b>93</b>  |
| 5.1      | Lösungstheorie geschalteter linearer DAEs . . . . .                                        | 93         |
| 5.2      | Lösbarkeit der geschalteten Netz-DAEs . . . . .                                            | 100        |
| 5.3      | Stabilität geschalteter linearer DAEs . . . . .                                            | 101        |
| 5.4      | Stabilitätsanalyse der geschalteten Netz-DAE . . . . .                                     | 103        |
| 5.5      | Berücksichtigung von Inhomogenitäten . . . . .                                             | 115        |
| 5.5.1    | Konsistenz der Anfangswerte . . . . .                                                      | 116        |
| 5.5.2    | Sprung- und Impulsverhalten unter Einfluss von Inhomogenitäten . . .                       | 118        |
| <b>6</b> | <b>Zusammenfassung</b>                                                                     | <b>121</b> |
| <b>A</b> | <b>Technische Details</b>                                                                  | <b>123</b> |
| A.1      | Indextausch im Beweis von Lemma 5.5.5 . . . . .                                            | 123        |

|                                                           |            |
|-----------------------------------------------------------|------------|
| A.2 Stabilitätsbedingungen für geschaltete DAEs . . . . . | 124        |
| A.2.1 Nicht-geschaltete DAEs . . . . .                    | 124        |
| A.2.2 Geschaltete DAEs . . . . .                          | 125        |
| <b>Literaturverzeichnis</b>                               | <b>127</b> |
| <b>Symbole und Abkürzungen</b>                            | <b>127</b> |
| Physikalisches Symbolverzeichnis . . . . .                | 127        |
| Mathematisches Symbolverzeichnis . . . . .                | 128        |
| Akronyme . . . . .                                        | 130        |
| <b>Index</b>                                              | <b>139</b> |