

# Inhaltsverzeichnis

|                                                               |           |
|---------------------------------------------------------------|-----------|
| <b>INHALTSVERZEICHNIS .....</b>                               | <b>1</b>  |
| <b>FIGURENVERZEICHNIS .....</b>                               | <b>7</b>  |
| <b>TABELLENVERZEICHNIS .....</b>                              | <b>13</b> |
| <b>KAPITEL UND AUTOREN.....</b>                               | <b>17</b> |
| <b>DANKSAGUNG .....</b>                                       | <b>19</b> |
| <b>ZUSAMMENFASSUNG .....</b>                                  | <b>21</b> |
| <b>RESUME.....</b>                                            | <b>41</b> |
| <b>EXECUTIVE SUMMARY .....</b>                                | <b>61</b> |
| <b>1 HINTERGRUND.....</b>                                     | <b>81</b> |
| 1.1 Rahmen dieses Projekts.....                               | 81        |
| 1.2 Struktur der heutigen Stromversorgung und Potenziale..... | 81        |
| 1.2.1 Situation weltweit.....                                 | 81        |
| 1.2.2 Situation in der Schweiz.....                           | 83        |
| 1.3 Erfahrung des PSI.....                                    | 84        |
| 1.4 Literaturverzeichnis.....                                 | 85        |
| <b>2 ZIELSETZUNG UND RAHMEN DER ARBEIT .....</b>              | <b>87</b> |
| 2.1 Ziele.....                                                | 87        |
| 2.2 Rahmen der Arbeit .....                                   | 87        |
| <b>3 ANSATZ UND RAHMENBEDINGUNGEN .....</b>                   | <b>89</b> |
| 3.1 Basis für die Arbeit.....                                 | 89        |
| 3.2 Durchführung und Organisation der Arbeiten.....           | 90        |
| 3.3 Allgemeine Annahmen.....                                  | 91        |
| 3.4 Einschränkungen .....                                     | 91        |
| 3.5 Literaturverzeichnis.....                                 | 92        |
| <b>4 KLEINWASSERKRAFTWERKE.....</b>                           | <b>95</b> |
| 4.1 Einleitung .....                                          | 95        |
| 4.1.1 Definition .....                                        | 95        |
| 4.1.2 Globale und Europäische Stromversorgung und Trends..... | 96        |
| 4.1.3 Schweizer Stromversorgung und Trends .....              | 97        |
| 4.2 Technologiebeschreibung.....                              | 98        |
| 4.2.1 Aktuelle Technologien .....                             | 98        |
| 4.2.2 Zukünftige Technologien.....                            | 101       |
| 4.3 Potenzial zur Stromerzeugung.....                         | 102       |
| 4.3.1 Physikalisches Potenzial .....                          | 102       |
| 4.3.2 Technisches Potenzial .....                             | 104       |
| 4.4 Kosten.....                                               | 108       |
| 4.4.1 Derzeitige Kosten.....                                  | 108       |

|          |                                                                        |            |
|----------|------------------------------------------------------------------------|------------|
| 4.4.2    | Zukünftige Kosten.....                                                 | 112        |
| 4.5      | Umweltauswirkungen.....                                                | 113        |
| 4.5.1    | Derzeitige Technologien .....                                          | 113        |
| 4.5.2    | Zukünftige Technologien .....                                          | 116        |
| 4.6      | Entwicklung und Markteinführung beeinflussende Faktoren .....          | 116        |
| 4.6.1    | Begünstigende Faktoren.....                                            | 116        |
| 4.6.2    | Hindernisse.....                                                       | 116        |
| 4.6.3    | Rahmenbedingungen für zukünftige Entwicklung und Marktreife.....       | 117        |
| 4.7      | Offene Fragen, Forschungsaktivitäten und –bedarf .....                 | 117        |
| 4.8      | Schlussfolgerungen .....                                               | 118        |
| 4.9      | Abkürzungsverzeichnis .....                                            | 120        |
| 4.10     | Literaturverzeichnis.....                                              | 121        |
| <b>5</b> | <b>WINDENERGIE .....</b>                                               | <b>125</b> |
| 5.1      | Einleitung .....                                                       | 125        |
| 5.1.1    | Definition .....                                                       | 126        |
| 5.1.2    | Globale und europäische Stromversorgung und Trends .....               | 126        |
| 5.1.3    | Schweizer Stromversorgung und Trends .....                             | 128        |
| 5.2      | Technologiebeschreibung.....                                           | 129        |
| 5.2.1    | Derzeitige Technologie .....                                           | 129        |
| 5.2.2    | Zukünftige Technologien .....                                          | 135        |
| 5.3      | Potenzial zur Stromerzeugung.....                                      | 136        |
| 5.3.1    | Globale theoretische und technische Potenziale .....                   | 136        |
| 5.3.2    | Technisches Potenzial .....                                            | 136        |
| 5.4      | Kosten.....                                                            | 144        |
| 5.4.1    | Derzeitige Situation.....                                              | 144        |
| 5.4.2    | Zukünftige Kosten.....                                                 | 148        |
| 5.5      | Umweltauswirkungen.....                                                | 155        |
| 5.5.1    | Derzeitige Technologie .....                                           | 155        |
| 5.5.2    | Zukünftige Technologien .....                                          | 158        |
| 5.6      | Entwicklung und Markteinführung beeinflussende Faktoren .....          | 158        |
| 5.6.1    | Begünstigende Faktoren.....                                            | 158        |
| 5.6.2    | Hindernisse.....                                                       | 159        |
| 5.6.3    | Rahmenbedingungen für zukünftige Entwicklung und Marktreife.....       | 160        |
| 5.7      | Offene Fragen, Forschungsaktivitäten und –bedarf .....                 | 161        |
| 5.8      | Schlussfolgerungen .....                                               | 162        |
| 5.9      | Abkürzungsverzeichnis .....                                            | 165        |
| 5.10     | Literaturverzeichnis.....                                              | 166        |
| <b>6</b> | <b>STROMERZEUGUNGSPOTENZIAL VON BIOMASSE IN DER SCHWEIZ.....</b>       | <b>173</b> |
| 6.1      | Einleitung .....                                                       | 173        |
| 6.1.1    | Definition .....                                                       | 173        |
| 6.1.2    | Schweizer Stromversorgung und Trends für die Biomasseverstromung ..... | 174        |
| 6.2      | Technologiebeschreibung.....                                           | 175        |
| 6.2.1    | Marktentwicklung und Technologieentwicklung.....                       | 176        |
| 6.2.2    | Derzeitige Technologien .....                                          | 178        |
| 6.2.3    | Zukünftige Technologien .....                                          | 178        |
| 6.3      | Potenzial .....                                                        | 180        |
| 6.3.1    | Theoretisches Potenzial.....                                           | 180        |

|          |                                                                      |            |
|----------|----------------------------------------------------------------------|------------|
| 6.3.2    | Ökologisches Potenzial .....                                         | 181        |
| 6.4      | Kosten.....                                                          | 182        |
| 6.4.1    | Kosten ausgeführter Anlagen .....                                    | 183        |
| 6.4.2    | Erwartete Kostenentwicklung .....                                    | 186        |
| 6.5      | Umweltauswirkungen und Sicherheitsaspekte .....                      | 188        |
| 6.5.1    | Derzeitige Technologien .....                                        | 188        |
| 6.5.2    | Zukünftige Technologien .....                                        | 190        |
| 6.6      | Einflussfaktoren auf die Entwicklung und Markteinführung.....        | 190        |
| 6.6.1    | Förderfaktoren.....                                                  | 190        |
| 6.6.2    | Hindernisse.....                                                     | 191        |
| 6.6.3    | Rahmenbedingungen für die zukünftige Entwicklung und Marktreife..... | 191        |
| 6.7      | Offene Fragen, Forschungsaktivitäten und Forschungsbedarf.....       | 191        |
| 6.8      | Schlussfolgerungen .....                                             | 192        |
| 6.9      | Abkürzungsverzeichnis .....                                          | 193        |
| 6.10     | Literaturverzeichnis.....                                            | 194        |
| <b>7</b> | <b>PHOTOVOLTAIK .....</b>                                            | <b>197</b> |
| 7.1      | Einleitung .....                                                     | 197        |
| 7.1.1    | Definition / Funktionsprinzip .....                                  | 198        |
| 7.1.2    | Globale und europäische Stromversorgung und Trends .....             | 200        |
| 7.1.3    | Schweizer Stromversorgung und Trends .....                           | 201        |
| 7.2      | Technologiebeschreibung.....                                         | 201        |
| 7.2.1    | Allgemeines.....                                                     | 201        |
| 7.2.2    | Photovoltaikmarkt in der Schweiz .....                               | 203        |
| 7.2.3    | Weltmarkt.....                                                       | 205        |
| 7.2.4    | Solarzellen und deren Wirkungsgrade .....                            | 210        |
| 7.2.5    | Zukünftige Technologieentwicklung .....                              | 217        |
| 7.2.6    | Systeme und Anlagen.....                                             | 220        |
| 7.2.7    | Entsorgung und Recycling .....                                       | 221        |
| 7.2.8    | Produktionscharakteristik.....                                       | 222        |
| 7.3      | Potenzial .....                                                      | 222        |
| 7.3.1    | Einstrahlungspotenzial .....                                         | 222        |
| 7.3.2    | Flächenpotenzial .....                                               | 224        |
| 7.3.3    | Leistungspotenzial.....                                              | 224        |
| 7.3.4    | Energiepotenzial.....                                                | 226        |
| 7.3.5    | Einführungsgeschwindigkeit.....                                      | 231        |
| 7.4      | Kosten.....                                                          | 232        |
| 7.4.1    | Derzeitige Kosten.....                                               | 232        |
| 7.4.2    | Zukünftige Kosten.....                                               | 235        |
| 7.5      | Umweltauswirkungen und Sicherheitsaspekte .....                      | 240        |
| 7.5.1    | Umweltauswirkungen derzeitiger Technologien.....                     | 240        |
| 7.5.2    | Umweltauswirkungen zukünftiger Technologien .....                    | 241        |
| 7.5.3    | Risiken und Sicherheitsaspekte.....                                  | 241        |
| 7.6      | Einflussfaktoren auf die Entwicklung und Markteinführung.....        | 242        |
| 7.6.1    | Förderfaktoren.....                                                  | 242        |
| 7.6.2    | Hindernisse.....                                                     | 242        |
| 7.6.3    | Rahmenbedingungen für die zukünftige Entwicklung und Marktreife..... | 243        |
| 7.7      | Offene Fragen, Forschungsaktivitäten und Forschungsbedarf.....       | 244        |
| 7.8      | Ausblick .....                                                       | 245        |
| 7.9      | Schlussfolgerungen .....                                             | 245        |

|          |                                                                           |            |
|----------|---------------------------------------------------------------------------|------------|
| 7.10     | Anhang .....                                                              | 249        |
| 7.10.1   | Exergie der Solarstrahlung.....                                           | 249        |
| 7.11     | Abkürzungsverzeichnis .....                                               | 251        |
| 7.12     | Literatur .....                                                           | 252        |
| <b>8</b> | <b>SOLARTHERMISCHE UND -CHEMISCHE KRAFTWERKE .....</b>                    | <b>257</b> |
| 8.1      | Einleitung .....                                                          | 257        |
| 8.1.1    | Definition .....                                                          | 258        |
| 8.1.2    | Globale und europäische Stromversorgung und Trends .....                  | 260        |
| 8.1.3    | Schweizer Stromversorgung und Trends .....                                | 261        |
| 8.2      | Technologiebeschreibung.....                                              | 261        |
| 8.2.1    | Derzeitige Technologien .....                                             | 261        |
| 8.2.2    | Zukünftige Technologien.....                                              | 263        |
| 8.3      | Potenzial .....                                                           | 268        |
| 8.3.1    | Physikalisches Potenzial .....                                            | 268        |
| 8.3.2    | Technisches Potenzial .....                                               | 268        |
| 8.4      | Kosten.....                                                               | 271        |
| 8.4.1    | Derzeitige Kosten.....                                                    | 272        |
| 8.4.2    | Zukünftige Kosten.....                                                    | 273        |
| 8.5      | Umweltauswirkungen und Sicherheitsaspekte .....                           | 281        |
| 8.5.1    | Derzeitige Technologien .....                                             | 281        |
| 8.5.2    | Zukünftige Technologien.....                                              | 281        |
| 8.6      | Einflussfaktoren auf die Entwicklung und Markteinführung.....             | 282        |
| 8.6.1    | Förderfaktoren.....                                                       | 282        |
| 8.6.2    | Hindernisse.....                                                          | 283        |
| 8.6.3    | Rahmenbedingungen für die zukünftige Entwicklung und Marktreife.....      | 283        |
| 8.7      | Offene Fragen, Forschungsaktivitäten und Forschungsbedarf.....            | 284        |
| 8.8      | Schlussfolgerungen .....                                                  | 285        |
| 8.9      | Abkürzungsverzeichnis .....                                               | 290        |
| 8.10     | Literatur .....                                                           | 291        |
| <b>9</b> | <b>GEOTHERMIE.....</b>                                                    | <b>297</b> |
| 9.1      | Einführung.....                                                           | 297        |
| 9.1.1    | Globale und Europäische Stromversorgung, Wärmeversorgung und Trends ..... | 297        |
| 9.1.2    | Schweizer Stromversorgung, Wärmeversorgung und Trends.....                | 297        |
| 9.2      | Technologiebeschreibung.....                                              | 298        |
| 9.2.1    | Aktuelle Technologien .....                                               | 298        |
| 9.2.2    | Zukünftige Technologien.....                                              | 299        |
| 9.3      | Potenzial der Ressourcen.....                                             | 304        |
| 9.3.1    | Physikalisches Potenzial .....                                            | 304        |
| 9.3.2    | Technisches Potenzial .....                                               | 318        |
| 9.4      | Kosten der Stromerzeugung .....                                           | 318        |
| 9.4.1    | Kostenentwicklung.....                                                    | 318        |
| 9.4.2    | Entwicklung der Kosten/Versorgungs-Kurve .....                            | 323        |
| 9.5      | Umweltauswirkungen und Sicherheitsaspekte .....                           | 332        |
| 9.5.1    | Heutige Technologien .....                                                | 332        |
| 9.5.2    | Zukünftige Technologien.....                                              | 333        |
| 9.6      | Faktoren, welche die Entwicklung und Markteinführung beeinflussen .....   | 334        |
| 9.6.1    | Nachfragefaktoren.....                                                    | 334        |

|           |                                                                |            |
|-----------|----------------------------------------------------------------|------------|
| 9.6.2     | Hindernisse.....                                               | 334        |
| 9.6.3     | Anforderungen für zukünftige Entwicklung und Marktreife .....  | 334        |
| 9.7       | Offene Fragen, Forschungsaktivitäten und -bedarf.....          | 334        |
| 9.8       | Schlussfolgerungen .....                                       | 334        |
| 9.9       | Abkürzungsverzeichnis .....                                    | 336        |
| 9.10      | Literaturverzeichnis.....                                      | 337        |
| <b>10</b> | <b>WELLENKRAFT .....</b>                                       | <b>339</b> |
| 10.1      | Einführung.....                                                | 339        |
| 10.1.1    | Globale und Europäische Stromversorgung und Trends.....        | 340        |
| 10.1.2    | Schweizer Stromversorgung und Trends .....                     | 340        |
| 10.2      | Technologiebeschreibung.....                                   | 341        |
| 10.2.1    | Heutige Technologie.....                                       | 341        |
| 10.2.2    | Zukünftige Technologien .....                                  | 350        |
| 10.3      | Potenzial der Ressourcen.....                                  | 350        |
| 10.3.1    | Physikalisches Potenzial .....                                 | 350        |
| 10.3.2    | Technisches Potenzial .....                                    | 353        |
| 10.4      | Kosten.....                                                    | 354        |
| 10.4.1    | Aktuelle Kosten.....                                           | 354        |
| 10.4.2    | Optimierungsfaktoren .....                                     | 358        |
| 10.4.3    | Zukünftige Kosten.....                                         | 358        |
| 10.5      | Umweltauswirkungen und Sicherheitsaspekte .....                | 358        |
| 10.5.1    | Heutige Technologien .....                                     | 358        |
| 10.5.2    | Zukünftige Technologien .....                                  | 359        |
| 10.6      | Einflussfaktoren auf Entwicklung und Markteinführung.....      | 359        |
| 10.6.1    | Nachfragefaktoren.....                                         | 359        |
| 10.6.2    | Hindernisse.....                                               | 360        |
| 10.6.3    | Anforderungen an zukünftige Entwicklungen und Marktreife ..... | 360        |
| 10.7      | Offene Fragen, Forschungsaktivitäten und -bedarf.....          | 360        |
| 10.8      | Schlussfolgerungen .....                                       | 360        |
| 10.9      | Abkürzungsverzeichnis .....                                    | 361        |
| 10.10     | Literaturverzeichnis.....                                      | 362        |
| <b>11</b> | <b>NEUE NUKLEARANLAGEN.....</b>                                | <b>363</b> |
| 11.1      | Einleitung .....                                               | 363        |
| 11.2      | Technologien.....                                              | 364        |
| 11.2.1    | Phasen der Technologieentwicklung von Nuklearanlagen .....     | 364        |
| 11.2.2    | Technologien heute und in Zukunft .....                        | 367        |
| 11.3      | Brennstoffzyklus .....                                         | 384        |
| 11.3.1    | Typen von Brennstoffzyklen.....                                | 384        |
| 11.3.2    | Versorgung.....                                                | 386        |
| 11.3.3    | Brennstoffnutzung.....                                         | 392        |
| 11.3.4    | Entsorgung .....                                               | 393        |
| 11.3.5    | Proliferationsaspekte.....                                     | 396        |
| 11.3.6    | Schlussfolgerungen für die Schweiz .....                       | 397        |
| 11.4      | Politische und energiepolitische Rahmenbedingungen .....       | 398        |
| 11.4.1    | Bisherige Entwicklung .....                                    | 398        |
| 11.4.2    | Aktuelle Situation.....                                        | 399        |
| 11.4.3    | Ausblick .....                                                 | 399        |



|           |                                                                             |            |
|-----------|-----------------------------------------------------------------------------|------------|
| 11.5      | Stand der Kernenergie und Ausblick.....                                     | 400        |
| 11.5.1    | Kurzer Überblick zur Kernenergie heute .....                                | 400        |
| 11.5.2    | Zukünftige Entwicklung der Kernenergie in der Welt.....                     | 401        |
| 11.6      | Szenarios .....                                                             | 403        |
| 11.6.1    | Einleitung.....                                                             | 403        |
| 11.6.2    | Erneuerung der bestehenden Anlagen.....                                     | 403        |
| 11.6.3    | Ausbau mit neuen Standorten .....                                           | 406        |
| 11.6.4    | Vergleich der Szenarien .....                                               | 407        |
| 11.7      | Potenzial der Kernenergie in der Schweiz.....                               | 408        |
| 11.7.1    | Einflussfaktoren .....                                                      | 409        |
| 11.7.2    | Bezugsrechte .....                                                          | 410        |
| 11.8      | Kosten.....                                                                 | 411        |
| 11.8.1    | Derzeitige Situation.....                                                   | 411        |
| 11.8.2    | Zukünftige Entwicklung.....                                                 | 413        |
| 11.9      | Umweltauswirkungen und Sicherheitsaspekte .....                             | 416        |
| 11.9.1    | Kohlendioxid.....                                                           | 416        |
| 11.9.2    | Strahlenbelastung.....                                                      | 416        |
| 11.9.3    | Entsorgung .....                                                            | 417        |
| 11.9.4    | Sicherheit .....                                                            | 418        |
| 11.10     | Schlussfolgerungen .....                                                    | 419        |
| 11.11     | Abkürzungsverzeichnis .....                                                 | 420        |
| 11.12     | Literaturverzeichnis.....                                                   | 422        |
| <b>12</b> | <b>SCHLUSSFOLGERUNGEN .....</b>                                             | <b>427</b> |
| 12.1      | Elektrizität aus Neuen Erneuerbaren in der Schweiz .....                    | 427        |
| 12.2      | Import erneuerbarer Elektrizität .....                                      | 428        |
| 12.3      | Abschliessende Anmerkungen zu den Perspektiven der Neuen Erneuerbaren ..... | 429        |
| 12.4      | Neue nukleare Technologien.....                                             | 431        |