

## Inhalt

|            |  |           |
|------------|--|-----------|
|            | Geleitwort des Bundesministeriums für Bildung und Forschung  | 3         |
|            | Vorwort der Herausgeber  | 4         |
| <b>A</b>   | <b>Das aktuelle und zukünftige Markt- und Stromsystem</b>  | <b>25</b> |
| <b>A.1</b> | <b>Gestaltung des aktuellen und zukünftigen Markt- und Stromsystems</b>  | <b>29</b> |
|            | Management Summary   | 30        |
|            | Autoren  | 30        |
| 1          | Motivation   | 32        |
| 2          | Herausforderungen der Energieflexibilitätsvermarktung und (Weiter-) Entwicklung von kurzfristigen Anreizen für Energieflexibilität | 32        |
| 2.1        | Gegenwärtige Hemmnisse der Energieflexibilitätsvermarktung   | 32        |
| 2.2        | Energieflexibilitätsvermarktung profitabel gestalten   | 35        |
| 3          | Ein Strommarktdesign 2030–2050 zur Schaffung von langfristigen Anreizen für Energieflexibilität                                    | 46        |
| 3.1        | Strommärkte und Systemdienstleistungen   | 46        |
| 3.2        | Ziele und Erfolgsfaktoren eines zukunftsfähigen Strommarktdesigns  | 48        |
| 3.3        | Gestaltungsoptionen für ein zukunftsfähiges Strommarktdesign   | 49        |
| 3.4        | Strategische Gesichtspunkte eines zukünftigen Strommarktdesigns  | 53        |
| 3.5        | Vision eines Strommarktdesigns 2030–2050   | 55        |
| 3.6        | Ausgestaltung des Übergangs in ein zukunftsfähiges Strommarktdesign 2030–2050  | 57        |
| 4          | Energieflexibilität in einem zukunftsfähigen europäischen Strommarktdesign   | 64        |
| 5          | Literatur  | 64        |
| <b>A.2</b> | <b>Potenzialanalyse und systemische Betrachtung</b>  | <b>73</b> |
|            | Management Summary   | 74        |
|            | Autoren  | 74        |
| 1          | Ausgangssituation und Zielsetzung  | 76        |
| 2          | Energieflexibilitätsaudits   | 76        |
| 2.1        | Methodische Anforderungen und allgemeine Struktur des Energieflexibilitätsaudits   | 77        |

|     |   |     |
|-----|---|-----|
| 2.2 | Phase I: Identifizierung und Charakterisierung von<br>Energieflexibilitätsmaßnahmen   | 78  |
| 2.3 | Phase II: Bewertung des EFM-Katalogs  | 82  |
| 3   | Analyse der Energieflexibilitätspotenziale  | 83  |
| 3.1 | Energieflexibilitätspotenziale der deutschen Industrie  | 83  |
| 3.2 | Regionalisierung der Energieflexibilitätspotenziale   | 88  |
| 3.3 | Internationales Energieflexibilitätspotenzial   | 90  |
| 4   | Wechselwirkungen zwischen Flexibilität und CO <sub>2</sub> -Emissionen  | 93  |
| 4.1 | Abschätzung der CO <sub>2</sub> -Reduzierung beim Einsatz von<br>Energieflexibilitätsmaßnahmen                                | 93  |
| 4.2 | Auswirkungen von industriellen CO <sub>2</sub> -Verminderungsmaßnahmen auf die<br>Flexibilität von Prozessen und Technologien | 97  |
| 4.3 | Flexibilität und Kreislaufwirtschaft bei ausgewählten, disruptiv<br>dekarbonisierten Produktionstechniken                     | 104 |
| 5   | Systemische Kosten-Nutzen-Abschätzung   | 106 |
| 5.1 | Methodik zur systemischen Kosten-Nutzen-Abschätzung   | 106 |
| 5.2 | Auswahl, Charakterisierung und Matching der Einsatz- und<br>Flexibilitätsoptionen   | 107 |
| 5.3 | Systemisches Kosten-Nutzen-Verhältnis von Flexibilitätsoptionen für<br>stromnetzstabilisierende Einsatzoptionen               | 109 |
| 6   | Fazit   | 113 |
| 7   | Literatur   | 114 |

|            |   |            |
|------------|---|------------|
| <b>A.3</b> | <b>Energieflexible Modellregion Augsburg</b>  | <b>117</b> |
|            | Management Summary  | 118        |
|            | Autoren   | 118        |
| 1          | Ausgangssituation und Zielsetzung   | 121        |
| 2          | Lösungsbausteine der regionalen Vermarktung von industrieller<br>Energieflexibilität    | 122        |
| 2.1        | Ökonomischer Lösungsbaustein: Lokaler Flexibilitätshandel                               | 123        |
| 2.2        | Technische Lösungsbausteine: IKT-Lösungen für regionale<br>Nachfrageflexibilität        | 124        |
| 2.3        | Gesellschaftliche Lösungsbausteine  | 125        |
| 3          | Befähigung von energieflexiblen Fabriken in der Region Augsburg                         | 128        |
| 3.1        | Beschreibung des angewandten Vorgehens in der Energieflexiblen<br>Modellregion Augsburg | 128        |

|     |  |     |
|-----|--|-----|
| 3.2 | Themenfelder der Energieflexiblen Modellregion Augsburg                      | 130 |
| 3.3 | Anwendungsfälle in der Energieflexiblen Modellregion Augsburg                | 133 |
| 3.4 | Konzeptioneller Testbetrieb der Anwendungsfälle                              | 146 |
| 4   | Weiterentwicklung und Übertragung der Energieflexiblen Modellregion Augsburg | 148 |
| 4.1 | Energieflexibilitätpotenzial und CO <sub>2</sub> -Einsparung                 | 148 |
| 4.2 | Technische Übertragbarkeit auf weitere Regionen                              | 148 |
| 4.3 | Gesellschaftliche Perspektive zur erfolgreichen Weiterentwicklung            | 152 |
| 5   | Fazit und Ausblick   | 155 |
| 6   | Literatur  | 156 |

---

|          |   |            |
|----------|---|------------|
| <b>B</b> | <b>Managementsysteme für energieflexible Fabriken</b> | <b>159</b> |
|----------|---|------------|

---

|            |  |            |
|------------|--|------------|
| <b>B.1</b> | <b>Werkzeuge für die energetische Flexibilisierung</b>                           | <b>163</b> |
|            | Management Summary   | 164        |
|            | Formelverzeichnis  | 164        |
|            | Autoren  | 164        |
| 1          | Einleitung   | 166        |
| 2          | Werkzeuge zur Energieflexibilitätpotenzialanalyse                                | 167        |
| 2.1        | Grundlagen   | 167        |
| 2.2        | Schnell-Check-Tool   | 168        |
| 2.3        | Energieflexibilitätsaudit  | 168        |
| 2.4        | E-Flex-Scanner   | 168        |
| 2.5        | Flexibilitätseinsatzplanungstool   | 169        |
| 3          | Werkzeuge zur Konzeption und Planung   | 170        |
| 3.1        | Grundlagen und Anwendungsbeispiel  | 170        |
| 3.2        | Technische Umsetzung   | 171        |
| 3.3        | Beispielhafte Demonstration der Anwendung  | 173        |
| 3.4        | Zusammenfassung  | 175        |
| 4          | Umsetzung und Implementierung am Beispiel von Speicher-Wandler-Systemen          | 176        |
| 4.1        | Digitaler Retrofit für den energieflexiblen Betrieb von Kälteversorgungssystemen | 176        |
| 4.2        | Anwendungsbeispiel   | 179        |
| 4.3        | Zusammenfassung  | 181        |

|     |  |     |
|-----|--|-----|
| 5   | Operative Energieflexibilitätsvermarktung                                | 181 |
| 5.1 | Die Plattform »Flexys« zur Vermarktung von Energieflexibilität           | 181 |
| 5.2 | Forschungs- und Vermarktungsansätze                                      | 182 |
| 5.3 | Plattform-Konzept zur Vermarktung von Energieflexibilität                | 182 |
| 5.4 | Funktionsweise und Einsatz von »Flexys«                                  | 183 |
| 6   | Controlling und Monitoring am Beispiel Last- und Flexibilitätsmanagement | 184 |
| 6.1 | Grundlagen   | 184 |
| 6.2 | Last- und Flexibilitätsmanagement in der Kunststoffproduktion            | 185 |
| 6.3 | Last- und Flexibilitätsmanagement in der Automobilindustrie              | 190 |
| 6.4 | Zusammenfassung  | 193 |
| 7   | Betriebsoptimierung  | 194 |
| 7.1 | Grundlagen   | 194 |
| 7.2 | Anwendungsfall   | 199 |
| 7.3 | Zusammenfassung  | 204 |
| 8   | Zusammenfassung und Ausblick   | 205 |
| 9   | Literatur  | 206 |

---

|            |  |            |
|------------|--|------------|
| <b>B.2</b> | <b>Energieflexibilitätsorientierte Prozessplanung</b>  | <b>211</b> |
|            | Management Summary                                     | 212        |
|            | Formelverzeichnis                                      | 212        |
|            | Autoren  | 213        |
| 1          | Einleitung   | 214        |
| 1.1        | Betrieb des Elektrostahlwerks                          | 214        |
| 1.2        | Fluktuation des Energiebedarfs                         | 215        |
| 2          | Vorhandene Planungsinstrumente                         | 217        |
| 2.1        | Monatlicher Produktions- und Energieplan               | 217        |
| 2.2        | Ablaufplanung im Stahlwerk                             | 219        |
| 2.3        | Monatlicher Instandhaltungsbericht                     | 220        |
| 2.4        | Lastmanagement   | 222        |
| 3          | Entwicklung einer neuen Planungsplattform              | 224        |
| 3.1        | Vorbemerkungen und Zielsetzungen                       | 224        |
| 3.2        | Erneuerung der Ablauf- und Energieplanung im Stahlwerk | 225        |
| 3.3        | Bestimmung des spezifischen Energiebedarfs             | 229        |

|     |   |     |
|-----|---|-----|
| 3.4 | Nutzung von Energieflexibilität                                     | 230 |
| 3.5 | Ermittlung des 15-Minuten-Forecasts                                 | 232 |
| 4   | Decision-Support-Tool zur Prüfung von Energieflexibilitätsmaßnahmen | 233 |
| 5   | Literatur   | 235 |

---

|            |   |            |
|------------|---|------------|
| <b>B.3</b> | <b>Integration der Flexibilitätsvermarktung</b>           | <b>237</b> |
|            | Management Summary  | 238        |
|            | Autoren   | 238        |
| 1          | Einleitung  | 240        |
| 1.1        | Einordnung und Motivation                                 | 240        |
| 1.2        | Ziele der Energiesynchronisationsplattform                | 241        |
| 2          | Referenzarchitektur                                       | 242        |
| 2.1        | Energiesynchronisationsplattform                          | 242        |
| 2.2        | Marktplattform  | 243        |
| 2.3        | Marktplattformseitige Services                            | 246        |
| 2.4        | Unternehmensplattform                                     | 246        |
| 2.5        | Unternehmensplattformseitige Kernkomponenten und Services | 248        |
| 3          | Energieflexibilitätsdatenmodell                           | 249        |
| 3.1        | Notwendigkeit des Datenmodells                            | 249        |
| 3.2        | Ziel und Zweck des Datenmodells                           | 250        |
| 3.3        | Klassen des Datenmodells                                  | 250        |
| 3.4        | Exemplarische Beschreibung                                | 253        |
| 4          | Prozesse und Informationsflüsse                           | 255        |
| 4.1        | Prozessmodell der Energiesynchronisationsplattform        | 255        |
| 4.2        | Umsetzung von Prozessen                                   | 257        |
| 5          | Informationstechnische Sicherheit                         | 261        |
| 5.1        | Maßnahmen des Security-Prozesses                          | 261        |
| 5.2        | Umsetzungsmaßnahmen                                       | 266        |
| 6          | Demonstratoren  | 269        |
| 6.1        | Übersicht der Demonstratoren                              | 269        |
| 6.2        | Wichtigste Erkenntnisse                                   | 271        |
| 7          | Fazit und Ausblick  | 271        |
| 8          | Literatur   | 272        |

|            |  |            |
|------------|--|------------|
| <b>C</b>   | <b>Technologien für energieflexible Fabriken</b>                             | <b>277</b> |
| <b>C.1</b> | <b>Chlor-Alkali-Elektrolyse</b>  | <b>281</b> |
|            | Management Summary   | 282        |
|            | Formelverzeichnis  | 282        |
|            | Autoren  | 283        |
| 1          | Grundlagen und Potenziale der Chlor-Alkali-Elektrolyse                       | 284        |
| 1.1        | Energieflexible Chlor-Alkali-Elektrolyse                                     | 284        |
| 1.2        | Einordnung der Energieflexibilitätsmaßnahmen in der Chlor-Alkali-Elektrolyse | 286        |
| 1.3        | Energieflexible Chlor-Alkali-Elektrolyse bei der Covestro Deutschland AG     | 288        |
| 1.4        | Abschätzung des Energieflexibilitätspotenzials                               | 289        |
| 2          | Technische Umsetzung der Energieflexibilitätsmaßnahmen                       | 290        |
| 2.1        | Auswirkung flexibler Fahrweise auf die Langzeitstabilität                    | 290        |
| 2.2        | Spülverhalten einer Chlor-Alkali-Elektrolysezelle                            | 291        |
| 3          | Wirtschaftliche Bewertung der Energieflexibilitätsmaßnahmen                  | 293        |
| 3.1        | Energieflexibilitätsoptionen und ihre Auswirkungen auf den Gesamtprozess     | 293        |
| 3.2        | LCA-Studie der Energieflexibilitätsmaßnahmen                                 | 293        |
| 4          | Literatur  | 295        |
| <b>C.2</b> | <b>Lastflexible Extraktion biobasierter Carbonsäuren</b>                     | <b>297</b> |
|            | Management Summary   | 298        |
|            | Formelverzeichnis  | 298        |
|            | Autoren  | 298        |
| 1          | Grundlagen und Potenziale der elektrifizierten Carbonsäureherstellung        | 299        |
| 1.1        | Abschätzung des Energieflexibilitätspotenzials                               | 304        |
| 2          | Technische Umsetzung   | 307        |
| 3          | Wirtschaftliche Bewertung der ausgewählten Energieflexibilitätsmaßnahmen     | 313        |
| 4          | Literatur  | 315        |

|            |   |            |
|------------|---|------------|
| <b>C.3</b> | <b>Flexible Luftzerlegungsanlagen</b>   | <b>319</b> |
|            | Management Summary  | 320        |
|            | Autoren   | 321        |
| 1          | Grundlagen und Potenziale von energieflexiblen Luftzerlegungsanlagen  | 322        |
| 1.1        | Energieflexible Luftzerlegungsanlagen   | 322        |
| 1.2        | Einordnung der Energieflexibilitätsmaßnahmen  | 323        |
| 1.3        | Flexible Luftzerlegungsanlagen bei Linde Engineering  | 324        |
| 1.4        | Flexible Kompressoren bei MAN Energy Solutions  | 324        |
| 1.5        | Abschätzung des Energieflexibilitätspotenzials  | 325        |
| 2          | Technische Umsetzung der ausgewählten Energieflexibilitätsmaßnahmen   | 327        |
| 2.1        | Robustifizierung des Hauptwärmeübertragers  | 327        |
| 2.2        | Erweiterter Lastbereich der Kompressoren  | 330        |
| 2.3        | Flexible Betriebsstrategien und Digitale Zwillinge  | 336        |
| 3          | Wirtschaftlichkeit der ausgewählten Flexibilitätsmaßnahmen  | 341        |
| 4          | Literatur   | 341        |
| <b>C.4</b> | <b>Papierherstellung</b>  | <b>345</b> |
|            | Management Summary  | 346        |
|            | Autoren   | 347        |
| 1          | Grundlagen und Potenziale der energieflexiblen Papierherstellung  | 348        |
| 1.1        | Energieflexible Papierherstellung   | 348        |
| 1.2        | Einordnung der Energieflexibilitätsmaßnahmen der energieflexiblen Papierherstellung                         | 350        |
| 1.3        | Energieflexible Papierherstellung bei UPM   | 351        |
| 1.4        | Abschätzung des Energieflexibilitätspotenzials  | 352        |
| 2          | Technische Umsetzung der ausgewählten Energieflexibilitätsmaßnahmen   | 355        |
| 2.1        | Standort Plattling: Energieflexibilität unter Desinvestitionsbedingungen<br>»DesFlex«                       | 356        |
| 2.2        | Standort Schongau: Energieflexibilität in der Halbstofffertigung<br>»FlexPulp«                              | 357        |
| 2.3        | Standorte Dörpen, Plattling, Schongau: Skalierbare<br>energieflexibilitätsfördernde IT-Architektur »EnFlex« | 358        |
| 3          | Wirtschaftlichkeit der ausgewählten Energieflexibilitätsmaßnahmen   | 359        |
| 3.1        | Standort Plattling: Wirtschaftlichkeit der technischen<br>Energieflexibilitätsmaßnahmen                     | 360        |

|  |  |            |
|--|--|------------|
| 3.2  | Standort Schongau: Wirtschaftlichkeit der technischen<br>Energieflexibilitätsmaßnahmen                         | 360        |
| 3.3  | Standorte Dörpen, Plattling, Schongau: Wirtschaftlichkeit der IT-seitigen<br>Energieflexibilitätsmaßnahmen     | 363        |
| 4  | Literatur  | 363        |
| <b>C.5 Aluminiumelektrolyse</b>                |  | <b>367</b> |
|  | Management Summary   | 368        |
|  | Formelverzeichnis  | 368        |
|  | Autoren  | 369        |
| 1  | Grundlagen und Potenziale der flexiblen Aluminiumelektrolyse   | 370        |
| 1.1  | Energieflexible Aluminiumelektrolyse   | 370        |
| 1.2  | Einordnung der Energieflexibilitätsmaßnahmen der Aluminiumelektrolyse  | 371        |
| 1.3  | Energieflexible Aluminiumelektrolyse bei der TRIMET Aluminium SE   | 371        |
| 1.4  | Abschätzung des Energieflexibilitätspotenzials   | 372        |
| 2  | Technische Umsetzung des Digitalen Zwillings   | 372        |
| 2.1  | Prozessvorhersagemodell  | 372        |
| 2.2  | Magnetohydrodynamik-Modell   | 379        |
| 2.3  | Prozessüberwachung: Anodenstrommessung   | 382        |
| 2.4  | Digitaler Zwilling zur Steuerung energieflexibler<br>Aluminiumelektrolysezellen                                | 386        |
| 3  | Wirtschaftlichkeit der ausgewählten Flexibilitätsmaßnahmen   | 388        |
| 4  | Literatur  | 389        |
| <b>C.6 Klimatisierungs- und Raumluftechnik</b> |  | <b>393</b> |
|  | Management Summary   | 394        |
|  | Autoren  | 395        |
| 1  | Grundlagen und Potenziale der branchenübergreifenden Klimatisierungs- und<br>Raumluftechnik                    | 396        |
| 1.1  | Energieflexible Klimatisierungs- und Raumluftechnik  | 396        |
| 1.2  | Einordnung der Energieflexibilitätsmaßnahmen von<br>branchenübergreifender Klimatisierungs- und Raumluftechnik | 397        |
| 1.3  | Energieflexible Klimatisierungs- und Raumluftechnik bei der<br>B+T Oberflächentechnik GmbH                     | 398        |



|                         |  |            |
|-------------------------|--|------------|
| 1.4                     | Energieflexible Technologie für klimatisierte Räume und Gebäude in der Industrie am Beispiel eines Kühltowers (Intercool GmbH, Dr. Oetker) | 398        |
| 1.5                     | Abschätzung des Energieflexibilitätpotenzials  | 400        |
| 2                       | Energieflexible Klimatisierungs- und Raumlufttechnik in der ETA-Fabrik   | 402        |
| 2.1                     | Technische Umsetzung der ausgewählten Flexibilitätsmaßnahmen   | 402        |
| 2.2                     | Wirtschaftlichkeit der ausgewählten Flexibilitätsmaßnahmen   | 410        |
| 3                       | Energieflexible Klimatisierungs- und Raumlufttechnik bei B+T GmbH  | 412        |
| 3.1                     | Technische Umsetzung der ausgewählten Flexibilitätsmaßnahme  | 412        |
| 3.2                     | Wirtschaftliche Bewertung der ausgewählten Flexibilitätsmaßnahme   | 413        |
| 4                       | Literatur  | 414        |
| <b>C.7 Prozesskälte</b> |  | <b>417</b> |
|                         | Management Summary   | 418        |
|                         | Autoren  | 419        |
| 1                       | Grundlagen und Potenziale branchenübergreifender Prozesskältebereitstellung  | 420        |
| 1.1                     | Energieflexible Prozesskältebereitstellung   | 420        |
| 1.2                     | Einordnung der Energieflexibilitätsmaßnahmen branchenübergreifender Prozesskältebereitstellung   | 420        |
| 1.3                     | Energieflexible Prozesskältebereitstellung bei der DMK Group   | 421        |
| 1.4                     | Energieflexible Prozesskältebereitstellung bei Mercedes-Benz   | 421        |
| 1.5                     | Energieflexible Prozesskältebereitstellung bei der Badischen Staatsbrauerei Rothaus  | 422        |
| 2                       | Abschätzung des Energieflexibilitätpotenzials  | 423        |
| 3                       | Prozesskälteversorgung im milchverarbeitenden Gewerbe  | 424        |
| 3.1                     | Technische Umsetzung der ausgewählten Energieflexibilitätsmaßnahmen  | 424        |
| 3.2                     | Wirtschaftliche Bewertung der ausgewählten Energieflexibilitätsmaßnahmen   | 426        |
| 4                       | Energieflexible Prozesskälteversorgung in der Automobilindustrie   | 427        |
| 4.1                     | Technische Umsetzung der ausgewählten Energieflexibilitätsmaßnahmen  | 428        |
| 4.2                     | Wirtschaftliche Bewertung der ausgewählten Energieflexibilitätsmaßnahmen   | 429        |
| 5                       | Energieflexible Prozesskälteversorgung im Brauereigewerbe  | 431        |
| 5.1                     | Technische Umsetzung der ausgewählten Energieflexibilitätsmaßnahmen  | 432        |

|            |   |            |
|------------|---|------------|
|            | 5.2 Wirtschaftliche Bewertung der ausgewählten<br>Energieflexibilitätsmaßnahmen             | 435        |
| 6          | Literatur   | 437        |
| <b>C.8</b> | <b>Prozesswärme</b>   | <b>439</b> |
|            | Management Summary  | 440        |
|            | Autoren   | 440        |
| 1          | Grundlagen und Potenziale branchenübergreifender<br>Prozesswärmebereitstellung              | 441        |
|            | 1.1 Energieflexible Prozesswärmebereitstellung  | 441        |
|            | 1.2 Energieflexibilitätsmaßnahmen der Prozesswärmebereitstellung                            | 441        |
|            | 1.3 Energieflexible Prozesswärmebereitstellung bei Evonik                                   | 442        |
|            | 1.4 Energieflexible Prozesswärmebereitstellung bei Schaeffler                               | 442        |
|            | 1.5 Abschätzung des Energieflexibilitätspotenzials  | 443        |
| 2          | Energieflexible Prozesswärmeversorgung in der chemischen Industrie                          | 444        |
|            | 2.1 Technische Umsetzung der ausgewählten Energieflexibilitätsmaßnahmen                     | 444        |
|            | 2.2 Wirtschaftliche Bewertung der ausgewählten<br>Energieflexibilitätsmaßnahmen             | 448        |
| 3          | Energieflexible Prozesswärmeversorgung in der metallverarbeitenden Industrie                | 449        |
|            | 3.1 Technische Umsetzung der ausgewählten Energieflexibilitätsmaßnahmen                     | 449        |
|            | 3.2 Wirtschaftliche Bewertung der ausgewählten<br>Energieflexibilitätsmaßnahmen             | 455        |
| 4          | Literatur   | 457        |
| <b>C.9</b> | <b>Bivalenter Nichteisenmetalldruckguss</b>   | <b>459</b> |
|            | Management Summary  | 460        |
|            | Autoren   | 460        |
| 1          | Grundlagen und Potenziale der energieflexiblen Technologien im<br>Nichteisenmetalldruckguss | 461        |
| 2          | Energieflexibler Nichteisenmetalldruckguss  | 462        |
|            | 2.1 Schmelzofen   | 463        |
|            | 2.2 Beschichtungsprozesses  | 464        |
|            | 2.3 Recyclingofen   | 464        |
|            | 2.4 Einordnung der Energieflexibilitätsmaßnahmen im<br>Nichteisenmetalldruckguss            | 466        |

|     |   |     |
|-----|---|-----|
| 2.5 | Energieflexibilitätsmaßnahmen des Nichteisenmetalldruckgusses bei der Torun Bark Magnesium GmbH | 466 |
| 2.6 | Abschätzung des Energieflexibilitätspotenzials  | 467 |
| 3   | Technische Umsetzung eines bivalenten Ofens   | 467 |
| 3.1 | Vorauswahl des Brennersystems   | 468 |
| 3.2 | Steuerung und Regelung  | 468 |
| 3.3 | Konstruktion  | 469 |
| 3.4 | Numerische Simulation   | 471 |
| 4   | Wirtschaftlichkeit der ausgewählten Energieflexibilitätsmaßnahme                                | 476 |
| 5   | Literatur   | 478 |

---

|             |  |            |
|-------------|--|------------|
| <b>C.10</b> | <b>Bivalente Wärmebehandlung in der Massivumformung</b>                    | <b>481</b> |
|             | Management Summary   | 482        |
|             | Autoren  | 482        |
| 1           | Grundlagen und Potenziale in der Massivumformung                           | 483        |
| 1.1         | Wärmebehandlung in der Massivumformung                                     | 483        |
| 1.2         | Energieflexibilitätsmaßnahmen bei Hirschvogel Group                        | 483        |
| 1.3         | Abschätzung des Energieflexibilitätspotenzials                             | 485        |
| 2           | Technische Umsetzung der bivalenten Wärmebehandlung in der Massivumformung | 486        |
| 2.1         | Wärmebehandlungsofen   | 486        |
| 2.2         | Konzept zur bivalenten Wärmeversorgung                                     | 487        |
| 2.3         | Simulationsbasierte Untersuchung der Anlage                                | 488        |
| 2.4         | Ergebnisse der Simulation  | 490        |
| 2.5         | Umsetzung der bivalenten Anlage  | 493        |
| 2.6         | Fazit der technischen Umsetzung  | 495        |
| 3           | Wirtschaftlichkeit der ausgewählten Flexibilitätsmaßnahmen                 | 497        |
| 4           | Literatur  | 498        |

---

|             |  |            |
|-------------|--|------------|
| <b>C.11</b> | <b>Hybride Beheizung in der Stahlindustrie</b>                           | <b>501</b> |
|             | Management Summary   | 502        |
|             | Autoren  | 502        |
| 1           | Grundlagen und Potenziale einer hybriden Beheizung in der Stahlindustrie | 503        |
| 1.1         | Energieflexible Beheizung in der Stahlindustrie                          | 503        |

|     |  |     |
|-----|--|-----|
| 1.2 | Einordnung der Energieflexibilitätsmaßnahme der Wärmebereitstellung eines hybriden Strahlrohrs | 504 |
| 1.3 | Projektpartner   | 505 |
| 1.4 | Abschätzung des Energieflexibilitätspotenzials   | 506 |
| 2   | Technische Umsetzung der hybriden Beheizung  | 506 |
| 2.1 | Anforderungen  | 506 |
| 2.2 | Konzeptentwicklung   | 507 |
| 2.3 | Konstruktion des Prototyps   | 507 |
| 2.4 | Test der elektrischen Beheizung  | 508 |
| 2.5 | Komplettmontage  | 509 |
| 2.6 | Test der Gasbeheizung  | 510 |
| 2.7 | Betriebsnahe Untersuchungen  | 511 |
| 3   | Wirtschaftliche Bewertung der ausgewählten Energieflexibilitätsmaßnahmen                       | 513 |
| 4   | Literatur  | 514 |

---

|             |   |            |
|-------------|---|------------|
| <b>C.12</b> | <b>Energieträgerübergreifende hybride Energiespeicher</b>   | <b>517</b> |
|             | Management Summary  | 518        |
|             | Autoren   | 518        |
| 1           | Grundlagen und Potenziale von Energiespeichertechnologien in der Automobilindustrie                       | 519        |
| 1.1         | Energieflexibilitätsmaßnahmen der energieträgerübergreifenden hybriden Energiespeicher                    | 519        |
| 1.2         | Energieträgerübergreifende hybride Energiespeicherung bei Mercedes-Benz                                   | 519        |
| 1.3         | Abschätzung des Energieflexibilitätspotenzials  | 520        |
| 2           | Energieträgerübergreifende hybride Energiespeicherung in der Automobilindustrie                           | 521        |
| 3           | Technische Umsetzung der energieträgerübergreifenden hybriden Energiespeicher                             | 522        |
| 3.1         | Anwendungsfälle für (hybride) Energiespeicher   | 523        |
| 3.2         | Prognosetool für thermische und elektrische Energieverbräuche zum Betrieb hybrider Energiespeichersysteme | 526        |
| 3.3         | Auslegung und Bewertung eines hybriden Energiespeichers im Automobilwerk                                  | 528        |
| 3.4         | Umsetzung des methodischen Vorgehens über ein Simulations- und Analysetool                                | 530        |

|   |  |     |
|---|--|-----|
| 4 | Wirtschaftliche Bewertung des Einsatzes von hybriden Energiespeichern für ein<br>Automobilwerk | 531 |
|   | 4.1 Fazit und Ausblick   | 534 |
| 5 | Literatur  | 534 |