

Inhalt

|            |                                                                                                                |           |
|------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------|
|            | Geleitwort des Bundesministeriums für Bildung und Forschung                                                    | 3         |
|            | Einleitung                                                                                                     | 4         |
|            | Literatur                                                                                                      | 8         |
| 1          | Zusammenfassung                                                                                                | 24        |
| 1.1        | Teil A: Energiewirtschaftliche Grundlagen, aktuelle und zukünftige energetische Flexibilitätspotenziale        | 24        |
| 1.2        | Teil B: Querschnittstechnologien für Energieflexibilität                                                       | 25        |
| 1.3        | Teil C: Ausgewählte Anwendungsfälle aus Wirtschaftszweigen                                                     | 26        |
| 2          | Executive Summary                                                                                              | 33        |
| 2.1        | Part A: Basics of the Energy System and Energy Management, Current and Future Potential for Energy Flexibility | 33        |
| 2.2        | Part B: Across-the-board Technologies to Enable Energy Flexibility                                             | 34        |
| 2.3        | Part C: Selected Use Cases from Economic Sectors                                                               | 35        |
| <hr/>      |                                                                                                                |           |
| <b>A</b>   | <b>Energiewirtschaftliche Grundlagen, aktuelle und zukünftige energetische Flexibilitätspotenziale</b>         | <b>43</b> |
| <hr/>      |                                                                                                                |           |
| <b>A.1</b> | <b>Das Energieflexibilitätspotenzial der deutschen Industrie</b>                                               | <b>45</b> |
|            | Autoren                                                                                                        | 46        |
|            | Abkürzungen für Formeln                                                                                        | 47        |
|            | Indizes für Formeln                                                                                            | 47        |
| 1          | Abschätzung des Energieflexibilitätspotenzials der deutschen Industrie                                         | 48        |
| 1.1        | Einleitung                                                                                                     | 48        |
| 1.2        | Allgemeine Begriffsdefinition                                                                                  | 48        |
| 1.3        | Flexibilitätshorizont                                                                                          | 50        |
| 2          | Bisherige Analysen im Bereich industrieller Energieflexibilität                                                | 51        |
| 2.1        | Einleitung                                                                                                     | 51        |
| 2.2        | Identifikation relevanter Studien                                                                              | 52        |
| 2.3        | Relevanzanalyse der identifizierten Studien                                                                    | 53        |
| 2.4        | Aufbereitung der studienspezifischen Daten                                                                     | 54        |
| 2.5        | Datenanalyse                                                                                                   | 56        |
| 2.6        | Auswertung                                                                                                     | 57        |
| 2.7        | Analyse der Energieflexibilitätsdimensionen                                                                    | 62        |

|     |                                                                                                              |     |
|-----|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| 2.8 | Zwischenfazit: Bisherige Arbeiten zur Abschätzung des energetischen Flexibilitätspotenzials in der Industrie | 78  |
| 3   | Methode zur Beschreibung und Erhebung von Energieflexibilitätspotenzialen                                    | 82  |
| 3.1 | Allgemeine Methode zur Potenzialerhebung                                                                     | 82  |
| 3.2 | Maßnahmenfragebogen zur Identifikation von einzelnen Flexibilitätsmaßnahmen im Werk                          | 84  |
| 3.3 | Aggregation von Flexibilitätspotenzialen auf Werksebene                                                      | 94  |
| 3.4 | Abschätzung von industriellen Flexibilitätspotenzialen in Deutschland                                        | 98  |
| 3.5 | Flexibilitätspotenzial der deutschen Industrie auf Wirtschaftszweigebene                                     | 101 |
| 3.6 | Innerbetriebliches Lastmanagement und dessen Auswirkungen auf die Mitarbeiter                                | 105 |
| 4   | Fazit                                                                                                        | 119 |
| 5   | Literatur                                                                                                    | 121 |

---

|            |                                                          |            |
|------------|----------------------------------------------------------|------------|
| <b>A.2</b> | <b>Industrielle Energieflexibilität im Energiesystem</b> | <b>127</b> |
|            | Autoren                                                  | 128        |
|            | Abkürzungen für Formeln                                  | 129        |
|            | Indizes für Formeln                                      | 129        |
| 1          | Einleitung                                               | 130        |
| 2          | Strommärkte und Systemdienstleistungen                   | 131        |
| 2.1        | Energy-Only-Märkte                                       | 131        |
| 2.2        | Systemdienstleistungen                                   | 135        |
| 3          | Grundlagen der Strombeschaffung in Unternehmen           | 143        |
| 3.1        | Grundlagen des Stromgroßhandels                          | 143        |
| 3.2        | Beschaffungsmodelle für Unternehmen                      | 145        |
| 3.3        | Strombeschaffung aus Unternehmenssicht                   | 150        |
| 4          | Flexibilitätshandel für Unternehmen                      | 154        |
| 4.1        | Vermarktung von Energieflexibilität                      | 154        |
| 4.2        | Erlöspotenziale durch Energieflexibilität                | 162        |
| 5          | Einschränkungen durch Regulatorik                        | 167        |
| 5.1        | Die Rolle der Regulatorik im Stromsystem                 | 167        |
| 5.2        | Flexibilitätsnutzung und Netzentgelte                    | 168        |
| 5.3        | Flexibilitätsnutzung und EEG-Umlage                      | 170        |
| 5.4        | Flexibilitätsnutzung und Marktzugangshemmnisse           | 171        |

|     |                                                              |     |
|-----|--------------------------------------------------------------|-----|
| 5.5 | Flexibilitätsnutzung auf Verteilnetzebene                    | 172 |
| 5.6 | Verzerrte Preissignale für Endverbraucher                    | 175 |
| 6   | Das energieflexible Markt- und Stromsystem der Zukunft       | 176 |
| 6.1 | Ausgangslage und Anforderungen                               | 176 |
| 6.2 | Management von Netzengpässen                                 | 177 |
| 6.3 | Herausforderungen für ein zukünftiges Markt- und Stromsystem | 182 |
| 7   | Fazit                                                        | 184 |
| 8   | Anhang                                                       | 185 |
| 9   | Literatur                                                    | 190 |

---

|            |                                                     |            |
|------------|-----------------------------------------------------|------------|
| <b>A.3</b> | <b>Erfahrungsbericht aus einer Modellregion</b>     | <b>195</b> |
|            | Autoren                                             | 196        |
| 1          | Ausgangssituation und Zielsetzung                   | 197        |
| 1.1        | Die Modellregion Augsburg                           | 197        |
| 1.2        | Technosphäre, Soziosphäre, Ökosphäre                | 199        |
| 2          | Der transdisziplinäre Ansatz                        | 201        |
| 2.1        | Was ist Transdisziplinarität?                       | 201        |
| 2.2        | Der transdisziplinäre Ansatz in der Modellregion    | 202        |
| 3          | Stakeholder- und Umfeldanalyse                      | 204        |
| 3.1        | Tools zur Projektkonstruktion                       | 204        |
| 3.2        | Tools zur Generierung von Wissen                    | 206        |
| 4          | Erstellung der Energieszenarien                     | 210        |
| 4.1        | Aufbau und Funktion der Simulationsumgebung         | 210        |
| 4.2        | Entwicklung repräsentativer Versorgungsszenarien    | 211        |
| 4.3        | Modellierung und Einsatz der Flexibilitätsmaßnahmen | 215        |
| 4.4        | Vorstellung und Diskussion der Ergebnisse           | 217        |
| 5          | Ökologische Bewertung der Flexibilitätseinsätze     | 220        |
| 5.1        | Methodische Grundlagen                              | 220        |
| 5.2        | Darstellung der Fallstudien                         | 221        |
| 5.3        | Vorstellung und Diskussion der Ergebnisse           | 225        |
| 6          | Konzeption und Ergebnisse des Stakeholder-Dialogs   | 230        |
| 6.1        | Zielbilder und Übertragungsmodell                   | 230        |
| 6.2        | Ergebnisse des Stakeholder-Dialogs                  | 231        |

|     |                                                        |     |
|-----|--------------------------------------------------------|-----|
| 7   | Einordnung in nationale und regionale Geschäftsmodelle | 232 |
| 7.1 | Netzdienliche Vermarktung                              | 232 |
| 7.2 | Unternehmensinterner Einsatz der Flexibilität          | 233 |
| 7.3 | Ein Ampelmodell als Managementinstrument               | 233 |
| 7.4 | Ansätze für die regionale Vermarktung                  | 234 |
| 8   | Fazit und Ausblick                                     | 237 |
| 9   | Literatur                                              | 238 |

---

## **B Querschnittstechnologien für Energieflexibilität** **243**

---

|            |                                                            |            |
|------------|------------------------------------------------------------|------------|
| <b>B.1</b> | <b>Industrie 4.0 als Befähiger für Energieflexibilität</b> | <b>245</b> |
|            | Autoren                                                    | 246        |
|            | Weitere beteiligte Partner                                 | 247        |
|            | Abkürzungen für Formeln und Tabellen                       | 248        |
| 1          | Einleitung                                                 | 249        |
| 2          | Energiesynchronisationsplattform                           | 250        |
| 2.1        | Ziele und Vision                                           | 250        |
| 2.2        | Aufbau und Betreibermodell                                 | 251        |
| 2.3        | Stakeholder                                                | 253        |
| 2.4        | Funktionsweise                                             | 254        |
| 2.5        | Einordnung in das Smart Grid Architecture Model            | 256        |
| 2.6        | Datenmodell zur Flexibilitätsbeschreibung                  | 258        |
| 2.7        | Referenzbeispiele                                          | 262        |
| 3          | Unternehmensplattform                                      | 265        |
| 3.1        | Beschreibung und Ziel der Unternehmensplattform            | 265        |
| 3.2        | Aufbau der Unternehmensplattform                           | 266        |
| 3.3        | Referenzservices auf der Unternehmensplattform             | 271        |
| 4          | Marktplattform                                             | 279        |
| 4.1        | Beschreibung und Ziel der Marktplattform                   | 279        |
| 4.2        | Aufbau der Marktplattform                                  | 280        |
| 4.3        | Referenzservices auf der Marktplattform                    | 281        |

|                                     |                                                                             |            |
|-------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------|------------|
| 5                                   | Informationssicherheit                                                      | 286        |
| 5.1                                 | Schutzziele der Energiesynchronisationsplattform                            | 287        |
| 5.2                                 | Sicherheitskonzept                                                          | 289        |
| 5.3                                 | Sicherheitsarchitektur                                                      | 294        |
| 6                                   | Implementierung der Energiesynchronisationsplattform                        | 299        |
| 6.1                                 | Energieflexibles Unternehmen im Strommarkt der Zukunft                      | 299        |
| 6.2                                 | Informationsflüsse auf der Energiesynchronisationsplattform                 | 301        |
| 7                                   | Fazit und Ausblick                                                          | 307        |
| 8                                   | Literatur                                                                   | 308        |
| <b>B.2 Produktionsinfrastruktur</b> |                                                                             | <b>313</b> |
|                                     | Autoren                                                                     | 314        |
|                                     | Weitere beteiligte Partner                                                  | 315        |
|                                     | Abkürzungen für Formeln und Tabellen                                        | 316        |
| 1                                   | Einleitung                                                                  | 317        |
| 1.1                                 | Ausgewiesene Potenziale in Studien                                          | 317        |
| 1.2                                 | Zentrale Forschungsfragen und methodisches Vorgehen                         | 318        |
| 2                                   | Bewerten von Energieflexibilitätpotenzialen in Fabrikbetrieben              | 322        |
| 2.1                                 | Technologiematrix und -steckbriefe                                          | 322        |
| 2.2                                 | Bewertung der Energieflexibilitätpotenziale bei industriellen Anwendungen   | 328        |
| 2.3                                 | Leitfaden zur Bewertung von Flexibilisierungspotenzialen in Fabrikbetrieben | 343        |
| 3                                   | Befähigen von Anlagen für einen energieflexiblen Betrieb                    | 348        |
| 3.1                                 | Monitoring und Kommunikation                                                | 348        |
| 3.2                                 | Innovative Konzepte und Demonstratoren                                      | 357        |
| 3.3                                 | Betriebsstrategien                                                          | 373        |
| 3.4                                 | Leitfaden zur Energieflexibilisierung im Brownfield                         | 380        |
| 4                                   | Transferieren der Erkenntnisse auf Industrieanlagen                         | 382        |
| 4.1                                 | Werkzeuge                                                                   | 382        |
| 4.2                                 | Energieflexibilisierung von Industrieanwendungen                            | 400        |
| 5                                   | Fazit und Ausblick                                                          | 412        |
| 6                                   | Literatur                                                                   | 413        |

|            |                                                                    |            |
|------------|--------------------------------------------------------------------|------------|
| <b>C</b>   | <b>Ausgewählte Anwendungsfälle aus Wirtschaftszweigen</b>          | <b>419</b> |
| <b>C.1</b> | <b>Methodik zur Entwicklung von Energieflexibilitätpotenzialen</b> | <b>421</b> |
|            | Autor                                                              | 422        |
|            | Weitere beteiligte Partner                                         | 422        |
| 1          | Einleitung                                                         | 423        |
| 2          | Vorgehensweise                                                     | 425        |
| 3          | Transparenzschaffung                                               | 425        |
| 3.1        | Definition der Systemgrenzen                                       | 426        |
| 3.2        | Transparenzstufen                                                  | 426        |
| 3.3        | Auswahl von Messmitteln                                            | 427        |
| 3.4        | Planung und Durchführung des Messablaufs                           | 428        |
| 3.5        | Identifikation von Handlungsschwerpunkten                          | 429        |
| 3.6        | Ermittlung des Differenzlastprofils                                | 430        |
| 3.7        | Ergebnis der Transparenzschaffung                                  | 431        |
| 4          | Wirtschaftlichkeitsbewertung                                       | 432        |
| 4.1        | Allgemeines Vorgehen                                               | 432        |
| 4.2        | Vereinfachtes Flexibilitätsbewertungstool                          | 433        |
| 5          | E-Flex Baustein                                                    | 435        |
| 5.1        | Anwendungsfälle zum Einsatz der Simulation                         | 435        |
| 5.2        | Architektur der Modellierung                                       | 436        |
| 5.3        | Zustandsmodellierung des Maschinenmoduls                           | 438        |
| 5.4        | Zentrale Module zur Steuerung der Energieflexibilität              | 440        |
| 5.5        | Simulationsergebnis                                                | 441        |
| 5.6        | Infrastruktur                                                      | 442        |
| 6          | Zusammenfassung                                                    | 444        |
| 7          | Literatur                                                          | 445        |
| <b>C.2</b> | <b>Aluminiumindustrie</b>                                          | <b>447</b> |
|            | Autoren                                                            | 448        |
|            | Weitere beteiligte Partner                                         | 448        |
|            | Abkürzungen für Formeln                                            | 448        |
| 1          | Einleitung                                                         | 449        |

|     |                                                      |     |
|-----|------------------------------------------------------|-----|
| 2   | Aluminium-Elektrolyse als »Virtuelle Batterie«       | 449 |
| 2.1 | Basis der Aluminium-Elektrolyse-Technik              | 449 |
| 2.2 | TRIMET Elektrolyse-Eckdaten                          | 451 |
| 2.3 | Flexibilisierung der Aluminiumelektrolyse            | 452 |
| 3   | Magnetfeldkompensation                               | 453 |
| 3.1 | Modellierung                                         | 453 |
| 3.2 | Ergebnisse der Modellierung                          | 454 |
| 3.3 | Montage der zusätzlichen MK-Stromschienen            | 457 |
| 4   | Flexibilitätpotenzial der »Virtuellen Batterie«      | 462 |
| 5   | Wirtschaftlichkeit                                   | 465 |
| 6   | Hemmnisse                                            | 465 |
| 7   | Flexibilitätsperspektiven                            | 466 |
| 7.1 | Investitionen zur Hebung des Flexibilitätpotenzials  | 466 |
| 7.2 | Wechselwirkungen zwischen Effizienz und Flexibilität | 467 |
| 8   | Fazit und Ausblick                                   | 467 |
| 9   | Literatur                                            | 467 |

---

|            |                                                                                  |            |
|------------|----------------------------------------------------------------------------------|------------|
| <b>C.3</b> | <b>Stahlindustrie</b>                                                            | <b>469</b> |
|            | Autoren                                                                          | 470        |
| 1          | Einleitung                                                                       | 471        |
| 2          | Elektrostahlherstellung mit Elektrolichtbogenöfen                                | 472        |
| 2.1        | Betriebsphasen des Einschmelzvorgangs                                            | 475        |
| 2.2        | Zeitverfügbarkeit eines Elektrolichtbogenofens                                   | 476        |
| 2.3        | Betriebsorganisation, Schichtplanung und Lastmanagement                          | 477        |
| 3          | Ermittlung des Flexibilitätpotenzials des Elektrolichtbogenofens                 | 478        |
| 3.1        | Fall A – Elektrostahlwerke mit Strangguss                                        | 479        |
| 3.2        | Fall B – Elektrostahlwerke mit Strangguss und Blockguss                          | 480        |
| 3.3        | Fall C – Elektrostahlwerke mit Blockguss                                         | 480        |
| 4          | Wirtschaftlichkeit                                                               | 480        |
| 5          | Hemmnisse und Wechselwirkungen                                                   | 481        |
| 6          | Flexibilitätsperspektiven und künftige Prozessänderungen in der Stahlherstellung | 482        |
| 6.1        | Flexibilitätsperspektiven in Walzwerken                                          | 482        |
| 6.2        | Hybridisierung                                                                   | 482        |
| 6.3        | Nutzung synthetischer Prozessgase                                                | 483        |

|       |                                                                               |            |
|-------|-------------------------------------------------------------------------------|------------|
| 7     | Wechselwirkungen zwischen Effizienz und Flexibilität                          | 483        |
| 8     | Fazit und Ausblick                                                            | 484        |
| 9     | Literatur                                                                     | 485        |
| <hr/> |                                                                               |            |
| C.4   | <b>Luftzerlegung</b>                                                          | <b>487</b> |
|       | Autoren                                                                       | 488        |
| 1     | Luftzerlegung und Flexibilisierung                                            | 489        |
| 2     | Prozessbeschreibung                                                           | 489        |
| 3     | Flexibilitätspotenziale in der Luftzerlegung                                  | 490        |
| 4     | Technologische Weiterentwicklungen zur Erhöhung des Flexibilitätspotenzials   | 492        |
| 4.1   | Schlüsselkomponenten – Robustifizierung des Hauptwärmetauschers               | 492        |
| 4.2   | Schlüsselkomponenten – Lastbereichserweiterung der Kompressoren               | 494        |
| 4.3   | Gesamtprozess – Dynamische Simulationen von Anlagenstopps und Anfahrvorgängen | 496        |
| 4.4   | Gesamtprozess – fortgeschrittene Regelungskonzepte                            | 499        |
| 5     | Fazit und Ausblick                                                            | 500        |
| 6     | Literatur                                                                     | 501        |
| <hr/> |                                                                               |            |
| C.5   | <b>Graphiterstellung</b>                                                      | <b>505</b> |
|       | Autoren                                                                       | 506        |
| 1     | Einleitung                                                                    | 507        |
| 2     | Prozessbeschreibung                                                           | 508        |
| 3     | Flexibilitätspotenzial und Hemmnisse                                          | 512        |
| 3.1   | Technisches Flexibilitätspotenzial                                            | 513        |
| 3.2   | Wirtschaftliches Flexibilitätspotenzial                                       | 516        |
| 4     | Fazit und Ausblick                                                            | 517        |
| 5     | Literatur                                                                     | 519        |
| <hr/> |                                                                               |            |
| C.6   | <b>(Bio-)Chemische Prozesse</b>                                               | <b>521</b> |
|       | Autoren                                                                       | 522        |
|       | Abkürzungen für Formeln                                                       | 522        |
| 1     | Flexibilisierung in der chemischen und biochemischen Industrie                | 523        |
| 2     | Schaltbare Chlor-Alkali-Elektrolyse                                           | 523        |

|     |                                                       |     |
|-----|-------------------------------------------------------|-----|
| 2.1 | Prozessbeschreibung                                   | 524 |
| 2.2 | Flexibilitätsabschätzung für Deutschland              | 525 |
| 2.3 | Wirtschaftliche Betrachtung                           | 525 |
| 2.4 | Demonstration im Labormaßstab                         | 528 |
| 3   | Flexible elektrochemische Extraktion von Carbonsäuren | 530 |
| 4   | Fazit und Ausblick                                    | 533 |
| 5   | Literatur                                             | 533 |

---

|            |                                                                                    |            |
|------------|------------------------------------------------------------------------------------|------------|
| <b>C.7</b> | <b>Fahrzeugbau</b>                                                                 | <b>537</b> |
|            | Autoren                                                                            | 538        |
|            | Abkürzungen für Formeln                                                            | 539        |
|            | Indizes für Formeln                                                                | 539        |
| 1          | Einleitung                                                                         | 540        |
| 2          | Konkretisierung von Flexibilitätsmaßnahmen                                         | 540        |
|            | 2.1 Teilbereiche eines Automobilaufbauwerks                                        | 540        |
|            | 2.2 Identifikation energetischer Bausteine                                         | 541        |
|            | 2.3 Identifikation, Klassifikation und Priorisierung von Flexibilitätsmaßnahmen    | 542        |
| 3          | Flexibilitätspotenziale eines energieflexiblen Automobilwerks                      | 548        |
|            | 3.1 Kombinatorik der Maßnahmen                                                     | 551        |
| 4          | Wirtschaftlichkeit von Flexibilitätsmaßnahmen                                      | 552        |
| 5          | Flexibilitätsperspektive                                                           | 553        |
|            | 5.1 Abschätzung der Energieflexibilitätspotenziale auf Ebene des Wirtschaftszweigs | 553        |
| 6          | Fazit und Ausblick                                                                 | 556        |
| 7          | Literatur                                                                          | 557        |

---

|            |                                       |            |
|------------|---------------------------------------|------------|
| <b>C.8</b> | <b>Nichteisenmetalldruckguss</b>      | <b>559</b> |
|            | Autoren                               | 560        |
|            | Abkürzungen für Formeln               | 560        |
| 1          | Einleitung                            | 561        |
| 2          | Prozessbeschreibung                   | 561        |
|            | 2.1 Kernprozesse der Druckgussbranche | 561        |
|            | 2.2 Technologien der Kernprozesse     | 562        |
|            | 2.3 Datenermittlung                   | 564        |

|             |                                                         |            |
|-------------|---------------------------------------------------------|------------|
| 3           | Flexibilitätpotentiale                                  | 566        |
| 3.1         | Ermittlung und Priorisierung der Flexibilitätpotentiale | 566        |
| 3.2         | Beschreibung der Flexibilitätsmaßnahmen                 | 567        |
| 3.3         | Methode zur Aggregation der Potenziale auf Werksebene   | 570        |
| 4           | Wirtschaftlichkeit von Flexibilitätsmaßnahmen           | 571        |
| 5           | Flexibilitätsperspektive                                | 573        |
| 6           | Fazit und Ausblick                                      | 577        |
| 7           | Literatur                                               | 578        |
| <hr/>       |                                                         |            |
| <b>C.9</b>  | <b>Lebensmittel</b>                                     | <b>581</b> |
|             | Autoren                                                 | 582        |
|             | Weitere beteiligte Partner                              | 582        |
| 1           | Einleitung                                              | 583        |
| 2           | Flexibilitätpotenzial beim Herstellungsprozess          | 585        |
| 2.1         | Produktionsprozess von Tiefkühlpizza                    | 585        |
| 2.2         | Produktionsprozess von Milchprodukten                   | 585        |
| 3           | Flexibilitätpotenzial bei Kühlhäusern                   | 587        |
| 3.1         | Technisches Flexibilitätpotenzial                       | 588        |
| 3.2         | Wirtschaftliches Flexibilitätpotenzial                  | 591        |
| 4           | Fazit und Ausblick                                      | 591        |
| 5           | Literatur                                               | 592        |
| <hr/>       |                                                         |            |
| <b>C.10</b> | <b>Papierindustrie</b>                                  | <b>595</b> |
|             | Autoren                                                 | 596        |
| 1           | Einleitung                                              | 597        |
| 2           | Prozessbeschreibung                                     | 600        |
| 3           | Flexibilitätpotenzial in der Papierindustrie            | 603        |
| 3.1         | Flexibilitätpotenzial                                   | 603        |
| 3.2         | Hemmnisse                                               | 606        |
| 4           | Literatur                                               | 607        |

|                                                                   |            |
|-------------------------------------------------------------------|------------|
| <b>C.11 Spezialglasherstellung</b>                                | <b>609</b> |
| Autoren                                                           | 610        |
| 1 Einleitung                                                      | 611        |
| 2 Beschreibung der betrachteten Prozesse                          | 611        |
| 3 Ermittlung des Flexibilitätspotenzials                          | 613        |
| 3.1 Flexibilitätspotenzial bei Reduktion der elektrischen Energie | 614        |
| 3.2 Flexibilitätspotenzial bei Erhöhung der elektrischen Energie  | 619        |
| 4 Wirtschaftlichkeit                                              | 623        |
| 5 Hemmnisse und Perspektiven                                      | 623        |
| 5.1 Flexibilitätshemmnisse bei der Glasherstellung                | 623        |
| 5.2 Flexibilitätsperspektiven bei der Glasherstellung             | 624        |
| 6 Fazit und Ausblick                                              | 624        |
| 7 Literatur                                                       | 625        |
| <b>C.12 Glasherstellung (Massenglas)</b>                          | <b>627</b> |
| Autoren                                                           | 628        |
| 1 Einführung                                                      | 629        |
| 2 Grundlegende Prozessschritte                                    | 630        |
| 3 Glaschemie                                                      | 631        |
| 4 Bedeutung der Massenglasherstellung in der Glasindustrie        | 631        |
| 5 Prozesscharakterisierung                                        | 633        |
| 5.1 Temperatur und Viskosität                                     | 634        |
| 5.2 Kontinuierlicher Produktionsprozess                           | 635        |
| 6 Flexibilisierung des Anteils an elektrischer Energie            | 636        |
| 7 Hemmnisse                                                       | 636        |
| 8 Technisches Flexibilitätspotenzial                              | 638        |
| 8.1 Elektrische Zusatzheizung (EZH)                               | 638        |
| 8.2 Kühlöfen                                                      | 639        |
| 8.3 Ausgleichsmaßnahmen                                           | 640        |
| 9 Wechselwirkungen zwischen Effizienz und Flexibilität            | 640        |

|      |                                                 |     |
|------|-------------------------------------------------|-----|
| 10   | Flexibilitätperspektiven in der Glasherstellung | 640 |
| 10.1 | Vollelektrische Schmelze (VES)                  | 641 |
| 10.2 | Oxy-Fuel-Wannen und Sauerstofferzeugungsanlage  | 641 |
| 10.3 | Ansatz des Satellitenprojekts »DisConMelter«    | 642 |
| 10.4 | Hybridöfen zur Schmelze von Glas                | 642 |
| 11   | Literatur                                       | 643 |

---

|             |                                                                                        |            |
|-------------|----------------------------------------------------------------------------------------|------------|
| <b>C.13</b> | <b>Maschinen- und Anlagenbau</b>                                                       | <b>645</b> |
|             | Autoren                                                                                | 646        |
| 1           | Einleitung                                                                             | 648        |
| 2           | Sensibilisierung – Von der Ressourceneffizienz zur Energieflexibilisierung             | 649        |
| 3           | Identifikation und Quantifizierung der Energieflexibilität im Maschinen und Anlagenbau | 650        |
| 3.1         | Transparenzschaffung – Vorgehensweise und Beispiele                                    | 650        |
| 3.2         | Katalog für Energieflexibilitätsmaßnahmen                                              | 657        |
| 3.3         | Innerbetriebliches Bewertungssystem für Energieflexibilitätsmaßnahmen                  | 659        |
| 4           | Befähigung von Maschinen, Anlagen und Prozessen zum energieflexiblen Betrieb           | 662        |
| 4.1         | Energieflexibler Fabrikbetrieb                                                         | 662        |
| 4.2         | Bivalente Kontakterwärmung                                                             | 663        |
| 4.3         | Energieflexibilisierung an spanenden Werkzeugmaschinen                                 | 665        |
| 4.4         | Ansatz zur agentenorientierten Steuerung energieflexibler Produktionssysteme           | 666        |
| 5           | Energiesensitive Produktionsplanungsmethoden                                           | 667        |
| 5.1         | Grundlagen energieorientierter PPS                                                     | 667        |
| 5.2         | Planung von Lastverschiebungen im Schmelzbetrieb                                       | 668        |
| 5.3         | Einsatz der Materialflusssimulation in der Massivumformung                             | 669        |
| 5.4         | Lastprognoseverfahren                                                                  | 671        |
| 6           | Qualitätsmanagement für die energiesynchrone Produktion                                | 672        |
| 7           | Fazit und Ausblick                                                                     | 673        |
| 8           | Literatur                                                                              | 674        |

|                                                                                  |            |
|----------------------------------------------------------------------------------|------------|
| <b>C.14 Feuerfestindustrie</b>                                                   | <b>677</b> |
| Autoren                                                                          | 678        |
| Weitere beteiligte Partner                                                       | 678        |
| Abkürzungen für Formeln                                                          | 679        |
| 1 Rohstoffschmelzanlage für Feuerfestmaterialien                                 | 680        |
| 1.1 Beschreibung der Rohstoffschmelzanlage und des Schmelzprozesses              | 681        |
| 2 Ermittlung des Flexibilitätspotenzials                                         | 684        |
| 2.1 Anforderungsprofile für Flexibilitätspotenziale                              | 684        |
| 2.2 Energetisches Flexibilitätspotenzial auf Werks- und Wirtschaftszweig-Ebene   | 685        |
| 3 Hemmnisse                                                                      | 686        |
| 3.1 Hemmnisse technischer Art                                                    | 686        |
| 3.2 Hemmnisse regulatorischer Art                                                | 687        |
| 3.3 Hemmnisse wirtschaftlicher Art                                               | 687        |
| 3.4 Hemmnisse kultureller Art                                                    | 688        |
| 4 Wirtschaftlichkeit der Schmelzanlage                                           | 688        |
| 5 Flexibilitätsperspektiven                                                      | 689        |
| 6 Wechselwirkungen zwischen Effizienz und Flexibilität                           | 690        |
| 7 Fazit und Ausblick                                                             | 691        |
| 8 Literatur                                                                      | 692        |
| <b>C.15 Einschätzung des Energieflexibilitätpotentials bei der Zementmahlung</b> | <b>695</b> |
| Autoren                                                                          | 696        |
| Abkürzungen für Formeln                                                          | 696        |
| 1 Zementherstellungsprozess und Mahlung                                          | 697        |
| 2 Ermittlung des Flexibilitätspotenzials                                         | 698        |
| 2.1 Modellierung einer flexiblen Betriebsweise von Zementmühlen                  | 699        |
| 2.2 Modellergebnisse                                                             | 703        |
| 3 Wechselwirkungen zwischen Effizienz und Flexibilität                           | 709        |
| 4 Fazit und Ausblick                                                             | 709        |
| 5 Literatur                                                                      | 711        |

---

|                                                                          |            |
|--------------------------------------------------------------------------|------------|
| <b>C.16 Prozessdampfbereitstellung in integrierten Verbundstandorten</b> | <b>713</b> |
| Autoren                                                                  | 714        |
| Abkürzungen für Formeln                                                  | 714        |
| 1    Einleitung                                                          | 715        |
| 2    Beschreibung des Industrieparks Höchst                              | 716        |
| 3    Beschreibung des verwendeten Stromszenarios                         | 718        |
| 4    Modellierung verschiedener Betriebsweisen                           | 719        |
| 5    Bewertung der Kosten                                                | 721        |
| 5.1    Bewertung der CO2-Emissionen                                      | 722        |
| 6    Bewertung der Flexibilität                                          | 722        |
| 7    Ergebnisse                                                          | 723        |
| 8    Hemmnisse                                                           | 726        |
| 9    Fazit und Ausblick                                                  | 727        |
| 10   Literatur                                                           | 728        |

---

|                  |            |
|------------------|------------|
| <b>Impressum</b> | <b>730</b> |
|------------------|------------|