

Inhalt

Geleitwort des Bundesministeriums für Bildung und Forschung	3
Vorwort der Herausgeber	4
A Das aktuelle und zukünftige Markt- und Stromsystem	25
A.1 Gestaltung des aktuellen und zukünftigen Markt- und Stromsystems	29
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
A.2 Potenzialanalyse und systemische Betrachtung	73
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 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 ₂ -Emissionen	93
4.1	Abschätzung der CO ₂ -Reduzierung beim Einsatz von Energieflexibilitätsmaßnahmen	93
4.2	Auswirkungen von industriellen CO ₂ -Verminderungsmaßnahmen auf die Flexibilität von Prozessen und Technologien	97
4.3	Flexibilität und Kreislaufwirtschaft bei ausgewählten, disruptiv 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 Flexibilitätsoptionen	107
5.3	Systemisches Kosten-Nutzen-Verhältnis von Flexibilitätsoptionen für stromnetzstabilisierende Einsatzoptionen	109
6	Fazit	113
7	Literatur	114
A.3	Energieflexible Modellregion Augsburg	117
	Management Summary	118
	Autoren	118
1	Ausgangssituation und Zielsetzung	121
2	Lösungsbausteine der regionalen Vermarktung von industrieller Energieflexibilität	122
2.1	Ökonomischer Lösungsbaustein: Lokaler Flexibilitätshandel	123
2.2	Technische Lösungsbausteine: IKT-Lösungen für regionale 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 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 Energieflexibilitätspotenzial und CO ₂ -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 Managementsysteme für energieflexible Fabriken 159

B.1 Werkzeuge für die energetische Flexibilisierung	163
Management Summary	164
Formelverzeichnis	164
Autoren	164
1 Einleitung	166
2 Werkzeuge zur Energieflexibilitätspotenzialanalyse	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.2	Energieflexibilitätsorientierte Prozessplanung	211
	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
<hr/>	
B.3 Integration der Flexibilitätsvermarktung	237
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

C	Technologien für energieflexible Fabriken	277
C.1	Chlor-Alkali-Elektrolyse	281
	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
C.2	Lastflexible Extraktion biobasierter Carbonsäuren	297
	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

C.3 Flexible Luftzerlegungsanlagen	319
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
C.4 Papierherstellung	345
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 »DesFlex«	356
2.2 Standort Schongau: Energieflexibilität in der Halbstofffertigung »FlexPulp«	357
2.3 Standorte Dörpen, Plattling, Schongau: Skalierbare energieflexibilitätsfördernde IT-Architektur »EnFlex«	358
3 Wirtschaftlichkeit der ausgewählten Energieflexibilitätsmaßnahmen	359
3.1 Standort Plattling: Wirtschaftlichkeit der technischen Energieflexibilitätsmaßnahmen	360

3.2	Standort Schongau: Wirtschaftlichkeit der technischen Energieflexibilitätsmaßnahmen	360
3.3	Standorte Dörpen, Plattling, Schongau: Wirtschaftlichkeit der IT-seitigen Energieflexibilitätsmaßnahmen	363
4	Literatur	363
<hr/>		
C.5	Aluminiumelektrolyse	367
	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 Aluminiumelektrolysezellen	386
3	Wirtschaftlichkeit der ausgewählten Flexibilitätsmaßnahmen	388
4	Literatur	389
<hr/>		
C.6	Klimatisierungs- und Raumlufttechnik	393
	Management Summary	394
	Autoren	395
1	Grundlagen und Potenziale der branchenübergreifenden Klimatisierungs- und Raumlufttechnik	396
1.1	Energieflexible Klimatisierungs- und Raumlufttechnik	396
1.2	Einordnung der Energieflexibilitätsmaßnahmen von branchenübergreifender Klimatisierungs- und Raumlufttechnik	397
1.3	Energieflexible Klimatisierungs- und Raumlufttechnik bei der B+T Oberflächentechnik GmbH	398

1.4	Energieflexible Technologie für klimatisierte Räume und Gebäude in der Industrie am Beispiel eines Kühlagers (Intercool GmbH, Dr. Oetker)	398
1.5	Abschätzung des Energieflexibilitätspotenzials	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

C.7	Prozesskälte	417
	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 Energieflexibilitätspotenzials	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 Energieflexibilitätsmaßnahmen	435
6 Literatur	437
<hr/>	
C.8 Prozesswärme	439
Management Summary	440
Autoren	440
1 Grundlagen und Potenziale branchenübergreifender 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 Energieflexibilitätsmaßnahmen	448
3 Energieflexible ProzesswärmeverSORGUNG in der metallverarbeitenden Industrie	449
3.1 Technische Umsetzung der ausgewählten Energieflexibilitätsmaßnahmen	449
3.2 Wirtschaftliche Bewertung der ausgewählten Energieflexibilitätsmaßnahmen	455
4 Literatur	457
<hr/>	
C.9 Bivalenter Nichteisenmetalldruckguss	459
Management Summary	460
Autoren	460
1 Grundlagen und Potenziale der energieflexiblen Technologien im Nichteisenmetalldruckguss	461
2 Energieflexibler Nichteisenmetalldruckguss	462
2.1 Schmelzofen	463
2.2 Beschichtungsprozesses	464
2.3 Recyclingofen	464
2.4 Einordnung der Energieflexibilitätsmaßnahmen im 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
C.10 Bivalente Wärmebehandlung in der Massivumformung		481
	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
C.11 Hybride Beheizung in der Stahlindustrie		501
	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

C.12 Energierägerübergreifende hybride Energiespeicher	517
Management Summary	518
Autoren	518
1 Grundlagen und Potenziale von Energiespeichertechnologien in der Automobilindustrie	519
1.1 Energieflexibilitätsmaßnahmen der energierägerübergreifenden hybriden Energiespeicher	519
1.2 Energierägerübergreifende hybride Energiespeicherung bei Mercedes-Benz	519
1.3 Abschätzung des Energieflexibilitätspotenzials	520
2 Energierägerübergreifende hybride Energiespeicherung in der Automobilindustrie	521
3 Technische Umsetzung der energierägerübergreifenden 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 Automobilwerk	531
4.1	Fazit und Ausblick	534
5	Literatur	534