

Alexander Sauer  
Eberhard Abele  
Hans Ulrich Buhl

# ENERGIEFLEXIBILITÄT IN DER DEUTSCHEN INDUSTRIE

Ergebnisse aus dem Kopernikus-Projekt – Synchronisierte und energieadaptive  
Produktionstechnik zur flexiblen Ausrichtung von Industrieprozessen auf eine  
fluktuierende Energieversorgung | SynErgie

GEFÖRDERT VOM

**KOPERNIKUS**  
SynErgie >>> **PROJEKTE**  
Die Zukunft unserer Energie



Bundesministerium  
für Bildung  
und Forschung

## 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 Flexibilitätmaßnahmen 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
<hr/>		
<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 Flexibilitätsmaßnahmen	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
<hr/>		
<b>B.2</b>	<b>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	Flexibilitätperspektiven	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
<hr/>		
<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	Flexibilitätperspektiven und künftige Prozessänderungen in der Stahlherstellung	482
6.1	Flexibilitätperspektiven 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/>		
<b>C.4</b>	<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/>		
<b>C.5</b>	<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/>		
<b>C.6</b>	<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
<hr/>		
<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
<hr/>		
<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	Flexibilitätspotentiale	566
3.1	Ermittlung und Priorisierung der Flexibilitätspotentiale	566
3.2	Beschreibung der Flexibilitätsmaßnahmen	567
3.3	Methode zur Aggregation der Potenziale auf Werksebene	570
4	Wirtschaftlichkeit von Flexibilitätsmaßnahmen	571
5	Flexibilitatperspektive	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	Flexibilitätspotenzial beim Herstellungsprozess	585
2.1	Produktionsprozess von Tiefkühlpizza	585
2.2	Produktionsprozess von Milchprodukten	585
3	Flexibilitätspotenzial bei Kühlhäusern	587
3.1	Technisches Flexibilitätspotenzial	588
3.2	Wirtschaftliches Flexibilitätspotenzial	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	Flexibilitätspotenzial in der Papierindustrie	603
3.1	Flexibilitätspotenzial	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	Flexibilitätsperspektiven 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 Flexibilitätpotenzials	684
2.1 Anforderungsprofile für Flexibilitätpotenziale	684
2.2 Energetisches Flexibilitätpotenzial 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 Flexibilitätperspektiven	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 Flexibilitätpotenzials	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>
------------------	------------