

# Inhalt

<b>Vorwort</b>	<b>XV</b>
<b>Über den Herausgeber</b>	<b>XVII</b>
<b>Autorenverzeichnis</b>	<b>XIX</b>
<b>1 Motivation und Annahmen zur nachhaltigen Produktion</b>	<b>1</b>
1.1 Begriff, Historie und Dimensionen der Nachhaltigkeit	1
1.1.1 Begriff und Historie	1
1.1.2 Dimensionen der Nachhaltigkeit	3
1.1.3 Weitere allgemeine Überlegungen zur Nachhaltigkeit	4
1.2 Leistungshemmung: Warum nicht nachhaltig gehandelt wird	6
1.2.1 Individuelle, gesellschaftliche und wirtschaftliche Hemmungen	6
1.2.2 Priorisierung der nachhaltigen Entwicklung	9
1.3 Leistungssteigerung: Wie Nachhaltigkeit Werte schafft	13
1.3.1 Unternehmerische Nachhaltigkeit	14
1.3.2 Die Rolle der Produktion	16
1.3.2.1 Die Produktion und ihre Rolle in der nachhaltigen Entwicklung	16
1.3.2.2 Strategien zur Umsetzung nachhaltiger Entwicklung in der Produktion	17
1.3.3 Die Rolle der Produktionswissenschaft	19
<b>TEIL A Gestaltung der nachhaltigen Produktion</b>	<b>25</b>
<b>2 Nachhaltigkeitsbewertung von Produkten und in Unternehmen</b>	<b>27</b>
2.1 Einführung in die Nachhaltigkeitsbewertung	27
2.1.1 Absolutes Nachhaltigkeitsverständnis	27
2.1.2 Lebenszyklus-Perspektive	29
2.2 Nachhaltigkeitsbewertung von Produkten	30
2.2.1 Ökobilanzierung (LCA)	30
2.2.1.1 Ziel und Untersuchungsrahmen	30
2.2.1.2 Sachbilanz	32
2.2.1.3 Wirkungsabschätzung	33
2.2.1.4 Auswertung	35
2.2.1.5 Zusammenfassung	35
2.2.2 Produktkategorieregeln	36

2.2.3	Vereinfachte Methoden: ökologische Fußabdrücke .....	36
2.2.3.1	Carbon Footprint .....	36
2.2.3.2	Wasser-Fußabdruck .....	36
2.2.4	Methodische Rahmen zur Ökobilanzierung .....	37
2.2.4.1	Umweltdeklarationen .....	37
2.2.4.2	Product Environmental Footprint .....	37
2.2.5	Absolute Environmental Sustainability Assessment (AESAs) .....	38
2.2.6	Soziale Lebenszyklusbewertung (S-LCA) .....	39
2.2.7	Ökonomische Nachhaltigkeitsbewertung, Lebenszykluskostenrechnung (LCC) ...	39
2.2.8	Integrierte Nachhaltigkeitsbewertung .....	41
2.3	Software und Datenbanken für die Nachhaltigkeitsbewertung .....	42
2.3.1	LCA-Software .....	42
2.3.1.1	Typen von LCA-Software .....	42
2.3.1.2	Beispiele vollumfänglicher LCA-Software .....	42
2.3.1.3	Beispiele spezialisierter LCA-Software .....	43
2.3.1.4	Aktuelle Weiterentwicklungen aus der Forschung .....	43
2.3.2	Sachbilanzdatenbanken für LCA .....	44
2.4	Nachhaltigkeitsmanagement in Unternehmen .....	45
2.4.1	Nachhaltigkeitsmanagement .....	45
2.4.2	Umweltmanagement nach ISO 14001 .....	47
2.4.3	Ökobilanz als Instrument zum Umwelt- und Nachhaltigkeitsmanagement .....	48
2.4.4	Normung und Standardisierung .....	49
<b>3</b>	<b>Nachhaltige Gestaltung von Produkten .....</b>	<b>53</b>
3.1	Gesetzliche Rahmenbedingungen .....	54
3.1.1	EU-Ökodesign-Richtlinie (2009/125/EG) .....	54
3.1.2	Energieverbrauchsrelevante-Produkte-Gesetz (EVPG) .....	55
3.1.3	Weitere relevante Gesetzgebungen .....	56
3.2	Nachhaltigkeitsperspektiven in der Produktgestaltung .....	56
3.2.1	Lebenszyklusperspektive .....	57
3.2.2	Materialperspektive .....	58
3.2.2.1	Sekundärmaterialien .....	59
3.2.2.2	Nachwachsende und bio-basierte Materialien .....	60
3.2.2.3	Biologisch abbaubare Materialien .....	61
3.2.2.4	Unschädliche Materialien .....	62
3.2.3	Verwertungsperspektive .....	62
3.2.3.1	Mechanisches Recycling .....	62
3.2.3.2	Chemisches Recycling .....	63
3.2.3.3	Biologisches Recycling .....	64
3.2.3.4	Thermische Verwertung .....	64
3.3	Nachhaltige Design-Strategien .....	65
3.3.1	Design for Dematerialization .....	66
3.3.2	Modular Design .....	67
3.3.3	Design for Disassembly .....	68
3.3.4	Design for Reuse .....	68
3.3.5	Design for Maintenance and Repair .....	69
3.3.6	Design for Remanufacturing .....	69

3.3.7	Design for and from Recycling .....	70
3.3.8	Design for Disposal für biologisch abbaubare Materialien .....	71
3.3.9	Cradle-to-Cradle®-Design .....	72
3.4	Nachhaltige Geschäftsmodelle .....	72
3.4.1	Nachhaltige Geschäftsmodelltypen .....	73
3.4.2	Abgrenzung zu zirkulären Geschäftsmodellen .....	76
3.5	Nachhaltige Produktzertifizierung .....	76
3.5.1	Energieverbrauchskennzeichnung (Verordnung (EU) 2017/1369) .....	77
3.5.2	Europäisches Umweltzeichen (Verordnung 66/2010/EG) .....	77
3.5.3	Blauer Engel .....	78
3.5.4	Cradle-to-Cradle®-Zertifizierung .....	79
3.5.5	Zertifizierung nach DIN-Normen .....	80
<b>4</b>	<b>Nachhaltigkeit im Produktionsnetzwerk .....</b>	<b>87</b>
4.1	Grundlagen zu Produktionsnetzwerken .....	88
4.1.1	Definition und Begriffsabgrenzung .....	88
4.1.2	Netzwerkstrategie und -planung .....	89
4.1.3	Entscheidungsvariablen der taktischen Netzwerkplanung .....	91
4.2	Nachhaltigkeitsbewertung aus der Netzwerkperspektive .....	94
4.2.1	Nachhaltigkeitsbewertung von unternehmensinternen Produktionsnetzwerken ..	95
4.2.2	Nachhaltigkeitsbewertung von unternehmensübergreifenden Produktionsnetzwerken .....	96
4.2.3	Nachhaltigkeitsbewertung von Transportnetzwerken .....	97
4.2.4	Nachhaltigkeitsbewertung von Beständen, Intralogistik und Linien .....	97
4.2.5	Herausforderungen in der Nachhaltigkeitsbewertung von Produktionsnetzwerken	99
4.3	Vorgehensweise zur Entwicklung eines Indikatorensets zur Gestaltung nachhaltiger Produktionsnetzwerke .....	99
4.3.1	Zusammenfassung des Lösungskonzepts .....	100
4.3.2	Manuelle Untersuchung der Indikatoren .....	100
4.3.3	Eingrenzen der Indikatoren nach Einfluss durch die Netzwerkplanung und nach unternehmensspezifischen Einflüssen .....	101
4.3.4	Diskussion des Vorgehens und des Indikatorensets .....	104
4.4	Zusammenfassung .....	105
<b>5</b>	<b>Nachhaltigkeit am Produktionsstandort .....</b>	<b>111</b>
5.1	Nachhaltigkeit auf Werksstrukturebene .....	112
5.1.1	Nachhaltigkeitssteigerung von Fabrikgebäuden .....	114
5.1.2	Energiemanagement auf Werksebene .....	116
5.2	Nachhaltigkeit auf Produktionssystemebene .....	119
5.2.1	Nachhaltigkeitssteigerung in linearen Wertschöpfungssystemen .....	119
5.2.2	Produktionssysteme für die Kreislaufwirtschaft .....	126
5.3	Nachhaltigkeit auf Produktionsstations-ebene .....	134
5.3.1	Effiziente Produktionsstationsgestaltung .....	135
5.3.2	Soziale Nachhaltigkeit an der Produktionsstation .....	140
5.4	Zusammenfassung .....	141

<b>6</b>	<b>Nachhaltigkeit in der Gestaltung und Herstellung von Komponenten</b>	<b>145</b>
6.1	Auswahl möglicher Herstellungsszenarien	145
6.2	Bewertung von Herstellungsszenarien	147
6.3	Prozessauslegung mit Fokus auf Nachhaltigkeit	153
6.4	Anwendungsbeispiele	155
6.4.1	Energieeffizientes Werkzeug zur Herstellung von Hubschrauberrotorblättern	155
6.4.2	Herstellung der Federbeinstütze im Automobilbau	160
6.4.3	Nutzung von Eigenspannungen in der Zahnradfertigung	163
<b>7</b>	<b>Nachhaltigkeitsrisikomanagement in der Produktion</b>	<b>167</b>
7.1	Motivation und Einordnung	167
7.1.1	Der Begriff des Nachhaltigkeitsrisikos	167
7.1.2	Relevanz für die Produktion am Standort Deutschland	169
7.1.3	Betrachtungsrahmen und Eingrenzung	170
7.1.3.1	Nachhaltigkeitsmodellierung und -bewertung in der Produktion	173
7.1.3.2	Datenverfügbarkeit in Produktionssystemen für die Nachhaltigkeits- bewertung und -modellierung	175
7.1.3.3	Identifizierung und Bewertung von Nachhaltigkeitsrisiken für Produktionssysteme	175
7.2	Forschung: Möglichkeiten zur Identifizierung und Bewertung von Nachhaltigkeitsrisiken in der Produktion	176
7.2.1	Die Rolle der Risikomodellierung	176
7.2.2	Anforderungen an das Management von Nachhaltigkeitsrisiken in der Produktion.	177
7.2.3	Ansatz zur Identifizierung und Bewertung von Nachhaltigkeitsrisiken in der Produktion	179
7.2.3.1	Anpassung der FMEA zur Integration von LCA-Methoden für die Identifizierung und Bewertung von Nachhaltigkeitsrisiken in Produktionssystemen	179
7.2.3.2	Daten	182
7.2.3.2.1	Lebenszykluswirkungsdaten für die Bewertung von Produktionsauswirkungen	182
7.2.3.2.2	Benchmarking-Daten für die Risikobewertung	182
7.2.4	Use-Case 1: Risikobewertung von Remanufacturing-Prozessen	183
7.2.5	Use-Case 2: Nachhaltigkeitsrisikoorientierte Fremdkapitalfinanzierung der Produktion	185
7.2.5.1	Relevanz produktionswirtschaftlicher Nachhaltigkeitsrisiken für die Finanzindustrie	186
7.2.5.2	Empirische Forschungsergebnisse zur Beziehung zwischen transitorischen Nachhaltigkeitsrisiken und Kreditrisiko	187
7.2.5.3	Grenzen bestehender Stresstests für transitorische Nachhaltigkeitsrisiken	187
7.3	Holistisches Risikomanagement für produzierende Unternehmen: das moderne Trilemma der Produktion	188
7.3.1	Das neue Trilemma der Produktion	188
7.3.2	Die Wechselwirkungen im Trilemma	189

7.3.3	Prinzipien und Umsetzbarkeit eines holistischen Risikomanagements in der unternehmerischen Praxis .....	191
7.4	Ausblick .....	191

## **8 Change Management in der nachhaltigen Produktion ..... 197**

8.1	Grundlagen des Change Managements .....	197
8.1.1	Definition des Begriffs Change Management .....	197
8.1.2	Auslöser von Veränderungen .....	198
8.1.3	Ansatzpunkte und Strategien .....	198
8.1.4	Change-Management-Modelle .....	200
8.1.5	Herausforderungen und Erfolgsfaktoren im Change Management .....	203
8.2	Relevante Faktoren des Change Managements für die nachhaltige Produktion .....	205
8.2.1	Grundlagen nachhaltiger Produktion .....	205
8.2.2	Auslöser von Veränderungen im Kontext der nachhaltigen Produktion .....	206
8.2.3	Umsetzung von Veränderungen in der nachhaltigen Produktion .....	208
8.2.4	Nachhaltige Veränderung in der Produktion: Treiber Kreislaufwirtschaft .....	208
8.2.5	Die Rolle des Change Managements in der nachhaltigen Transformation .....	209
8.3	Bedeutung des Änderungsmanagements in der nachhaltigen Produktion .....	211
8.3.1	Technisches Änderungsmanagement im Kontext des Change Managements .....	211
8.3.2	Ansätze des Änderungsmanagements in Produktion und Produktentwicklung ...	213
8.3.2.1	Prozesse des Änderungsmanagements .....	213
8.3.2.2	Methoden und Analysen im Änderungsmanagement .....	214
8.3.3	Änderungsmanagement im Kontext der nachhaltigen Produktion .....	215
8.4	Nachhaltigkeit und Digitalisierung: Erkenntnisse aus der digitalen Transformation für die nachhaltige Transformation .....	217
8.4.1	Digitalisierung in der Produktion und ihre Rolle als Treiber von Veränderungen..	217
8.4.2	Die Rolle von Change Management im digitalen Wandel .....	219
8.4.3	Erkenntnisse aus dem digitalen Wandel .....	219
8.4.4	Faktoren für einen erfolgreichen nachhaltigen Wandel in der Produktion .....	221

## **TEIL B Handlungsfelder in der nachhaltigen Produktion ..... 227**

## **9 Kreislaufwirtschaft in der Produktion ..... 229**

9.1	Grundlagen der Kreislaufwirtschaft .....	229
9.1.1	Motivation .....	229
9.1.2	Definitionen von Kreislaufwirtschaft .....	230
9.1.3	Entwicklung des Konzepts der Kreislaufwirtschaft – von 1960 bis heute mit Blick in die Zukunft .....	231
9.1.4	Ziele der Kreislaufwirtschaft und Zusammenhang mit Nachhaltigkeit .....	234
9.1.5	Prinzipien und Strategien der Kreislaufwirtschaft .....	235
9.1.5.1	Prinzipien der Kreislaufwirtschaft .....	235
9.1.5.2	Strategien der Kreislaufwirtschaft .....	235
9.2	Kreislaufwirtschaft und Produktion .....	244
9.2.1	Herausforderungen der Kreislaufwirtschaft für produzierende Unternehmen ....	245
9.2.2	Befähiger der Kreislaufwirtschaft in produzierenden Unternehmen .....	249
9.3	Zusammenfassung .....	254

<b>10</b>	<b>Circular Economy in der Produktion: Re-Assembly und Recycling</b>	<b>259</b>
10.1	Einleitung	259
10.2	Voraussetzung für die Umsetzung der Kreislaufwirtschaft in der Produktion	260
10.2.1	Digitale Produktakte	260
10.2.2	Digitaler Schatten	263
10.2.3	Zirkuläre Geschäftsmodelle	265
10.3	Nachhaltige Primärproduktfertigung	267
10.3.1	Ecodesign	267
10.3.2	Neue Produktmodularität	269
10.4	Re-Assembly in der Kreislaufwirtschaft	272
10.4.1	Re-Assembly für eine funktions- und wertsteigernde Kreislaufwirtschaft	272
10.4.2	Umsetzung des Re-Assemblys in der Produktion	274
10.4.3	Beispiele für die erfolgreiche Umsetzung von Re-Assembly-Prozessen in der Industrie	277
10.4.3.1	Re-Assembly am Beispiel eines Vierzylindermotors	277
10.4.3.2	Re-Assembly zur Prozesskostenoptimierung am Beispiel eines Wasserzählers	278
10.5	Wiederverwertung und Recycling	279
10.5.1	Arten des Recyclings	279
10.5.2	Recycling von Kunststoffen	280
10.5.3	Recyclingquoten	281
10.6	Zusammenfassung	282
<b>11</b>	<b>Soziale Nachhaltigkeit in der Produktion</b>	<b>287</b>
11.1	Wechselwirkungen zwischen Unternehmen und Gesellschaft	287
11.2	Produktionsbezogene soziale Nachhaltigkeit	290
11.3	Soziale Nachhaltigkeit im Produktionsnetzwerk	294
11.4	Produktionsmitarbeitende im Fokus	296
11.4.1	Lernen in der Produktion	297
11.4.2	Lernen mit einem tabletbasierten Assistenzsystem	300
11.5	Zusammenfassung: Chancen und Herausforderungen der sozialen Nachhaltigkeit	302
<b>12</b>	<b>Energieeinsatz im Kontext einer klimaneutralen Produktion</b>	<b>307</b>
12.1	Energiewirtschaftliche Grundlagen	307
12.1.1	Energietechnische Grundbegriffe	307
12.1.1.1	Energie und Leistung	307
12.1.1.2	Energieformen	307
12.1.1.3	Energiewandlung und Energieträger	308
12.1.2	Energieversorgung in Deutschland	309
12.1.3	Klimaneutralität	312
12.2	Energiebedarf und -verwendung in der Produktion	314
12.2.1	Energiebedarfe und -abwärme	314
12.2.1.1	Endenergiebedarfe der Produktion in Deutschland	315
12.2.1.2	Nutzenergiebedarfe für Energiedienstleistungen	315
12.2.1.3	Industrielle Abwärme	316

12.2.2	Energiesysteme in der Produktion .....	317
12.2.2.1	Querschnittstechnologien der Versorgungstechnik .....	318
12.2.2.2	Kaskadierte thermische Netze .....	320
12.2.2.3	Energieverbundsysteme in der Produktion .....	320
12.3	Erfassung und Bewertung des Energiebedarfs in der Produktion .....	322
12.3.1	Energie- und Umweltmanagementsysteme .....	322
12.3.1.1	Motivation für Energie- und Umweltmanagementsysteme .....	322
12.3.1.2	Begriffsdefinition und Aufbau von Managementsystemen .....	322
12.3.1.3	Energiemanagement nach DIN EN ISO 50001 ff. ....	323
12.3.1.4	Umweltmanagement nach DIN EN ISO 14001 .....	324
12.3.1.5	Ökobilanz und Carbon Footprint nach DIN EN ISO 14040 ff. ....	325
12.3.1.6	Weitere Normen .....	326
12.3.2	Energiedatenerfassung und -monitoring .....	326
12.3.2.1	Arten der Energiedatenerfassung .....	326
12.3.2.2	Vorgehen bei der energetischen Transparenzschaffung .....	327
12.3.3	Bewertung des Energie- und Ressourcenbedarfs .....	329
12.3.3.1	Bewertungsmethoden .....	329
12.3.3.2	Ressourcenverschwendungsarten .....	329
12.3.3.3	Maßnahmenkataloge .....	331
12.3.3.4	Automatisiertes Vorschlagswesen .....	332
12.4	Transformation zur klimaneutralen Produktion .....	333
12.4.1	Standards für Transformationsziele .....	333
12.4.2	Ansatzpunkte für die Transformation zur klimaneutralen Produktion .....	334
12.4.2.1	Reduktion von Emissionen .....	335
12.4.2.2	Substitution von emissionsverursachenden Prozessen .....	335
12.4.2.3	Kompensation von Emissionen .....	336
12.4.3	Strategieprozess für die Transformation zur klimaneutralen Produktion .....	337
12.4.3.1	Vorbereitung .....	338
12.4.3.2	Strategieentwicklung .....	338
12.4.3.3	Operative Umsetzung .....	339
<b>13</b>	<b>Regenerative Energieversorgung von Produktionssystemen .....</b>	<b>345</b>
13.1	Regenerative Bereitstellung von elektrischer Energie .....	345
13.1.1	Strom durch Netzbezug .....	345
13.1.2	Eigenerzeugung von Strom .....	347
13.1.2.1	Dezentrale, regenerative Stromerzeugungsanlagen in der Industrie ....	349
13.1.2.2	Anforderungen durch elektrische Lasten .....	352
13.1.2.3	Einbindung in das industrielle Mikronetz .....	353
13.2	Regenerative Bereitstellung von Prozesswärme .....	353
13.2.1	Status quo .....	354
13.2.2	Direkte Elektrifizierungsoptionen .....	357
13.2.2.1	Widerstandserhitzer .....	357
13.2.2.2	Wärmepumpen .....	358
13.2.3	Indirekte Elektrifizierungsoptionen .....	359
13.2.3.1	Alkalische Elektrolyse .....	360
13.2.3.2	Polymerelektrolytmembran-Elektrolyse .....	361
13.2.3.3	Festoxid-Elektrolyse .....	362

13.3	Herausforderungen und Lösungsansätze bei der regenerativen Energiebereitstellung . . . .	363
13.3.1	Volatile Stromerzeugung aus erneuerbaren Energien . . . . .	363
13.3.2	Variierende CO <sub>2</sub> -Äquivalente bei Strombezug aus dem öffentlichen Netz . . . . .	363
13.4	Anwendungsbeispiel . . . . .	365
<b>14</b>	<b>Energieeffizienz und Energieflexibilität in der Fertigung . . . . .</b>	<b>369</b>
14.1	Energieeffizienz in der Fertigung . . . . .	369
14.1.1	Grundlagen . . . . .	369
14.1.2	Energieeffiziente Fertigungsmaschinen . . . . .	369
14.1.2.1	Werkzeugmaschinen . . . . .	370
14.1.2.2	Reinigungsmaschinen . . . . .	373
14.1.2.3	Industrieöfen . . . . .	376
14.1.2.4	Spritzgießmaschinen . . . . .	377
14.1.3	Energieeffiziente Versorgungstechnik . . . . .	379
14.1.3.1	Prozesswärme . . . . .	379
14.1.3.2	Raumluftechnik . . . . .	380
14.1.3.3	Druckluft . . . . .	381
14.1.4	Sektorübergreifende Abwärmenutzung . . . . .	384
14.1.5	Energieeffiziente Gebäude . . . . .	386
14.2	Energieflexibilität in der Fertigung . . . . .	386
14.2.1	Grundlagen . . . . .	387
14.2.2	Ganzheitliche Fabrikoptimierung . . . . .	387
14.2.3	Energieflexible Produktionsplanung und -steuerung . . . . .	388
14.2.4	Energieflexible Versorgungstechnik . . . . .	389
14.2.4.1	Prozesskälte . . . . .	389
14.2.4.2	Prozesswärme . . . . .	390
14.2.4.3	Raumluftechnik . . . . .	391
<b>15</b>	<b>Anwendungsmöglichkeiten von Wasserstoff in der industriellen Produktion . . . . .</b>	<b>397</b>
15.1	Grundlagen der Nutzung von Wasserstoff . . . . .	398
15.1.1	Historische Entwicklung . . . . .	398
15.1.2	Aktuelle Entwicklung . . . . .	399
15.2	Herstellungsverfahren . . . . .	402
15.2.1	Konventionelle Verfahren . . . . .	403
15.2.2	Wasserelektrolyse . . . . .	404
15.2.3	Bewertung der Herstellungsmethoden . . . . .	407
15.3	Speicherung und Transport . . . . .	410
15.3.1	Speichertechnologien und Derivate . . . . .	411
15.3.2	Transport von Wasserstoff . . . . .	412
15.4	Anwendungsmöglichkeiten von Wasserstoff in der industriellen Produktion . . . . .	414
15.4.1	Anwendungsmöglichkeiten im Detail . . . . .	415
15.4.2	Bewertung, Einordnung und Diskussion . . . . .	422
15.5	Zusammenfassung . . . . .	423



<b>16</b>	<b>Nachhaltige Produktion in der Zukunft</b>	<b>429</b>
16.1	Relevanz der nachhaltigen Produktion in der Zukunft	430
16.2	Nachhaltige Produktion der Zukunft	430
16.3	Produktionswissenschaft für die Produktion von morgen	432
16.3.1	Digitale, automatisierte Transparenzschaffung	432
16.3.2	Integration von Remanufacturing in bestehende Produktionsinfrastruktur	433
16.3.3	Kreislaufwirtschaft für Produktionsanlagen	435
16.3.4	Energieflexibilisierung	437
16.4	Zusammenfassung	439
	<b>Stichwortverzeichnis</b>	<b>441</b>