

Inhalt

Vorwort	XV
Über den Herausgeber	XVII
Autorenverzeichnis	XIX
1 Motivation und Annahmen zur nachhaltigen Produktion	1
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
TEIL A Gestaltung der nachhaltigen Produktion	25
2 Nachhaltigkeitsbewertung von Produkten und in Unternehmen	27
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 (AES)	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	Umweltdatenmanagement nach ISO 14001	47
2.4.3	Ökobilanz als Instrument zum Umwelt- und Nachhaltigkeitsmanagement	48
2.4.4	Normung und Standardisierung	49
3	Nachhaltige Gestaltung von Produkten	53
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
4	Nachhaltigkeit im Produktionsnetzwerk	87
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
5	Nachhaltigkeit am Produktionsstandort	111
5.1	Nachhaltigkeit auf Werksstrukturerbene	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

6	Nachhaltigkeit in der Gestaltung und Herstellung von Komponenten	145
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
7	Nachhaltigkeitsrisikomanagement in der Produktion	167
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 Nachhaltigkeitsbewertung 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
7.1.1.1	Lebenszykluswirkungsdaten für die Bewertung von Produktionsauswirkungen	182
7.1.1.2	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

10 Circular Economy in der Produktion: Re-Assembly und Recycling	259
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-Assemblies 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
11 Soziale Nachhaltigkeit in der Produktion	287
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
12 Energieeinsatz im Kontext einer klimaneutralen Produktion	307
12.1 Energiewirtschaftliche Grundlagen	307
12.1.1 Energietechnische Grundbegriffe	307
12.1.1.1 Energie und Leistung	307
12.1.1.2 Energiformen	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
13	Regenerative Energieversorgung von Produktionssystemen	345
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 ₂ -Äquivalente bei Strombezug aus dem öffentlichen Netz	363
13.4 Anwendungsbeispiel	365
14 Energieeffizienz und Energieflexibilität in der Fertigung	369
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 Raumlufttechnik	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 Raumlufttechnik	391
15 Anwendungsmöglichkeiten von Wasserstoff in der industriellen Produktion	397
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

16 Nachhaltige Produktion in der Zukunft	429
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
Stichwortverzeichnis	441