

Rolf Kickuth

# Bio-inspired Computing

**Gehirn – künstliche Neuronetze – neuromorphe Architekturen  
...und wie es weitergeht: Photonik – Quantencomputer – Evolution**

Das Buch enthält 219 Abbildungen.

1. Auflage August 2020 © Agentur und Verlag Rubikon 2020

ISBN 978-3-9810449-6-6

Redaktion, Layout, Satz, Umschlaggestaltung: Agentur und Verlag Rubikon  
Rolf Kickuth, Bammentaler Straße 6-8, 69251 Gaiberg, Deutschland

Bibliographische Information der Deutschen Bibliothek

Die Deutsche Bibliothek verzeichnet diese Publikation  
in der Deutschen Nationalbibliografie.

Detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über <http://dnb.ddb.de> abrufbar.

Alle Rechte, auch die der Übersetzung in andere Sprachen, vorbehalten.

Dieses Werk ist urheberrechtlich geschützt. Jede Verwertung außerhalb der Grenzen des Urheberrechtsgesetzes ist ohne Zustimmung des Verlages unzulässig. Die Wiedergabe von Warenbezeichnungen, Handelsnamen oder sonstigen Kennzeichen in diesem Buch berechtigt nicht zu der Annahme, dass diese von jedermann frei benutzt werden dürfen. Vielmehr kann es sich auch dann um eingetragene Warenzeichen handeln, wenn sie nicht eigens als solche markiert sind.

Vorwort.....	16
<b>1 Keine Inspiration: Die Rechenmaschine.....</b>	<b>20</b>
1.1 Die Begriffe „Computer“ und „Inspiration“ .....	20
1.1.1 Computare: Eine Einschränkung von „Denken“ .....	20
1.1.2 Inspirare: Mit Leben füllen.....	21
1.2 Ein Blick in die Historie der Rechner.....	21
1.2.1 Mechanismus von Antikythera .....	21
1.2.2 Rechenmaschinen von Schickard und Pascal .....	23
1.2.3 Rechenmaschinen von Babbage.....	23
1.2.4 Entschlüsselungsmaschinen: Turing-Bombe und Colossus.....	24
1.3 Grundlagen von Digitalrechnern .....	27
1.4 Zwei Zustände, diskrete Signale, Gleitkommarechnung.....	28
1.5 Mit Relais, Röhren oder Transistoren: Logische Gatter.....	28
1.6 Von-Neumann-Architektur: Rechnen und Speichern getrennt.....	29
1.7 Treffsicheres Prognosewerkzeug: Mooresches Gesetz .....	31
1.7.1 Grenze durch die Quantenmechanik: Der Tunneleffekt.....	32
1.7.2 Grenze durch die Architektur: Der Von Neumann-Flaschenhals.....	33
1.8 Frühere Prognosen auf Basis des Mooreschen Gesetzes .....	34
<b>2 Das Gehirn entschlüsseln: Methoden der Hirnforschung.....</b>	<b>38</b>
2.1 Historische Entwicklung .....	38
2.1.1 Großhirnrinde funktionell gegliedert .....	38
2.1.1.1 <i>Elektroden im Hirn.....</i>	<i>39</i>
2.1.2 EEG: Erste Methode ohne Eingriff .....	40
2.2 Riesige Fortschritte durch Optogenetik .....	42
2.2.1 Großes Problem: Undurchsichtigkeit .....	43
2.2.1.1 <i>Durchsichtige Organismen .....</i>	<i>43</i>
2.2.1.2 <i>„Vergläserung“ des Gehirns.....</i>	<i>45</i>
2.3 Transkranielle Stimulationen.....	46
2.3.1 Transkranielle Magnetstimulation.....	46
2.3.2 Transkranielle Gleichstromstimulation .....	47
2.3.3 Transkranielle Wechselstromstimulation .....	48
2.4 Computertomographische Methoden.....	49
2.4.1 fMRT: Aktivität darstellen .....	49
2.4.2 Positronen-Emissions-Tomografie.....	51

2.4.2.1	<i>PET-Beispiel: Adenosin und Schlafmangel</i> .....	52
2.4.2.2	<i>Kombinationen von PET, CT und MRT</i> .....	53
2.4.3	<b>DW-MRI und DTI</b> .....	53
2.5	<b>Optoakustische Tomografie</b> .....	55
2.5.1	<b>Prinzip der optoakustischen Spektroskopie</b> .....	55
2.5.1.1	<i>Erwachsene Zebrafisch-Gehirne</i> .....	56
2.6	<b>Alle Methoden kommen zusammen</b> .....	56
2.6.1	<b>3D-Synapsenmodell zeigt Komplexität</b> .....	57
<b>3</b>	<b>Musterbeispiel an Komplexität: Aufbau und Funktion des Hirns</b> .....	<b>58</b>
3.1	<b>Herausforderung Konnektom</b> .....	59
3.1.1	<b>Bald Insektenhirn rekonstruiert</b> .....	59
3.2	<b>Das Gehirn – die „bunte Masse“</b> .....	60
3.3	<b>Zusammensetzung des menschlichen Gehirns</b> .....	60
3.3.1	<b>Hauptteile des menschlichen Gehirns</b> .....	61
3.4	<b>Neuronen und Synapsen</b> .....	62
3.4.1	<b>Moleküle, Synapsen und Neuronen unter der Lupe</b> .....	64
3.4.2	<b>Ein Navi fürs Nervenwachstum</b> .....	64
3.4.3	<b>Signalregulierung im adulten Hirn – molekularer Mechanismus fürs Lernen</b> .....	65
3.4.4	<b>Epigenetischer Einfluss</b> .....	65
3.4.5	<b>Synaptische Prozesse immer klarer</b> .....	66
3.4.5.1	<i>Neurotransmitter-Freisetzung</i> .....	66
3.4.5.2	<i>Synapsen altern</i> .....	67
3.4.5.3	<i>Flexible Geschwindigkeit</i> .....	67
3.5	<b>Neuronen und Strukturen für Lernvorgänge</b> .....	68
3.5.1	<b>Das Neuron lernt mit</b> .....	68
3.5.2	<b>Nochmals Synapsen: Mögliche physische Spur des Kurzzeitgedächtnisses gefunden</b> .....	69
3.6	<b>Weitreichende Lernmechanismen</b> .....	70
3.6.1	<b>Lesen lernen krepelt das Hirn um</b> .....	71
3.6.2	<b>Detaillierte räumliche Strukturen</b> .....	72
3.7	<b>Größere Nervenzell-Komplexe</b> .....	72
3.7.1	<b>Der Kitzel-Mechanismus – und Sex-Stimulation</b> .....	72
3.8	<b>Große Hirn-Substrukturen</b> .....	73
3.8.1	<b>Wichtige Faserverbindung</b> .....	74
3.8.2	<b>Essen und Amygdala</b> .....	74
3.9	<b>Zehn-Prozent-Mythos</b> .....	75

3.10	Elektrisch: Das Default Mode Network.....	76
3.10.1	Vermeintliches Rauschen führt zum DMN.....	76
3.10.2	Selbsterzeugtes Denken .....	77
3.10.3	Mehrere große Netzwerke .....	78
3.10.4	DMN am besten verbunden.....	79
3.10.5	Das DMN bei Drogen und Ästhetik .....	79
3.11	Aufklärung auf mehreren Skalen und in vielen Differenzierungen .....	80
<b>4</b>	<b>Bewusstsein nicht zu lokalisieren.....</b>	<b>82</b>
4.1	Neuronale Unterschiede bei Mann und Frau .....	82
4.2	Erinnerungen, Erfahrungen – und Zusammenhänge .....	83
4.3	Bewusstsein taucht auf.....	85
4.3.1	Homunculus und cartesianisches Theater .....	85
4.3.1.1	<i>Bindungsproblem .....</i>	<i>86</i>
4.3.2	Datenkompression vor dem Bewusstwerden.....	86
4.3.2.1	<i>Kann ich das fressen? .....</i>	<i>88</i>
4.4	Versuche, das Bewusstsein zu fassen.....	88
4.4.1	Gesehen und doch nicht bewusst.....	89
4.4.1.1	<i>Aufmerksamkeit heißt nicht Bewusstsein.....</i>	<i>89</i>
4.4.1.2	<i>Molekularer Schalter zum Bewusstsein.....</i>	<i>90</i>
4.4.1.3	<i>Aktivität unter Narkose .....</i>	<i>91</i>
4.5	Bereitschaftspotenzial und freier Wille.....	92
4.5.1	Das Libet-Experiment .....	92
4.5.1.1	<i>Frühes Bereitschaftspotenzial.....</i>	<i>92</i>
4.5.2	Unbewusste Entscheidungen bestätigt.....	94
4.5.3	Den Handlungswillen aufgezwungen .....	94
4.5.4	Von äußeren Umständen beeinflusst.....	94
4.5.4.1	<i>Selbstmordgefahr im fMRT zu erkennen .....</i>	<i>95</i>
4.6	Fazit: Bewusstsein ist emergent, freier Wille wohl eher Zufall .....	95
<b>5</b>	<b>Startpunkt für bio-inspirierte Computer: Neuronale Netze .....</b>	<b>98</b>
5.1	Anfänge Neuronen-bezogener Betrachtungen .....	99
5.1.1	Erstes Neuronenmodell .....	99
5.1.2	Erste Hypothese zum Mechanismus des Lernens.....	99
5.1.3	Lernen und Intelligenz .....	100
5.1.3.1	<i>Biologische Neuronetze: Ihre Lernmechanismen.....</i>	<i>100</i>

5.1.3.2	Der verwaschene Begriff der Intelligenz – natürlich und künstlich .....	101
5.1.3.3	Der Begriff „Künstliche Intelligenz“ taucht auf .....	102
5.2	Die „Bastelphase“ künstlicher neuronaler Netze .....	102
5.2.1	Ratte-aus-Labyrinth-Röhrenrechner.....	103
5.2.2	Perceptron erkennt Buchstaben .....	104
<b>6</b>	<b>Top down: Symbolische künstliche Intelligenz .....</b>	<b>106</b>
6.1	Von der begrifflichen Seite her .....	106
6.1.1	Der Turing-Test: The imitation game.....	107
6.1.2	Kommunikation mit ELIZA, Rat von MYCIN .....	108
6.1.3	MYCIN und CYC .....	109
6.1.4	Symbolische KI: Schach- und Jeopardy-Erfolg .....	110
6.2	Weitere KI-Hilfen: Fuzzy Logic und evolutionäre Algorithmen .....	110
6.2.1	Fuzzy-Logic hilft mit Unschärfe umzugehen .....	110
6.2.2	Evolutionäre Algorithmen optimieren – auch Neuronetze .....	112
6.2.2.1	Evolutionäre und genetische Algorithmen: Unterschiede.....	115
<b>7</b>	<b>Die Vielfalt künstlicher neuronaler Netze .....</b>	<b>116</b>
7.1	Feedforward-Netze .....	116
7.1.1	Backpropagation: Fehlerrückführung – Schicht für Schicht .....	117
7.1.2	Backpropagation nicht zwischen Bio-Neuronen .....	118
7.1.3	Eine Vielzahl von Parametern.....	118
7.1.4	Erste kommerzielle Anwendungen.....	119
7.1.5	Noch ein kleiner Neuro-Winter .....	120
7.2	Derzeitiger Standard künstlicher Neuronetze .....	120
7.2.1	Convolutional Neural Net: Strukturen erkennen .....	121
7.2.1.1	Höhere Effizienz durch Informationsbündelung .....	121
7.2.1.2	Herausforderung Robustheit.....	124
7.2.1.3	Die Fehler versickern im Neuronetz .....	125
7.2.2	ResNet mit hunderten verdeckter Neuronen-Schichten.....	126
7.2.3	LSTM-Netze: Der Faktor Zeit .....	126
7.3	Auf dem Vormarsch: Kontext-Verständnis, Kreativität, Lernen mit kurzem Training.....	128
7.3.1	Entitäten erkennen: Nach LSTM kommt der Transformer .....	128
7.3.2	GAN: generative adversarial network.....	130
7.3.2.1	DNN und Autoencoder .....	131
7.3.3	CapsNet: Hierarchische Repräsentationen .....	133

7.3.4	Hochkomplex: Reservoir Computing.....	135
7.3.4.1	<i>Reservoir Computing in Photonik und Spintronik.....</i>	<i>136</i>
7.3.4.2	<i>Reservoir Computing: Bakterien und Hirn.....</i>	<i>137</i>
<b>8</b>	<b>KNN: Verschiedene Lernmechanismen – und Erfolge.....</b>	<b>138</b>
8.1	Überwachtes und unüberwachtes Lernen .....	138
8.1.1	Lernen mit Anleitung: supervised learning .....	138
8.1.2	Reinforcement Learning: „Zuckerbrot und Peitsche“ .....	138
8.1.3	Selbstständiges Lernen durch Rückkopplung .....	139
8.1.3.1	<i>Spingläser als Neuronetz-Bauvorlage .....</i>	<i>139</i>
8.1.3.2	<i>Ähnlichkeiten mit vernetzten Neuronen.....</i>	<i>142</i>
8.1.3.3	<i>Das Hopfield-Modell: Rückkopplungen satt.....</i>	<i>142</i>
8.1.3.4	<i>ART-Netze: Selbstorganisierend.....</i>	<i>142</i>
8.1.4	Stabilität vs. Plastizität .....	143
8.1.5	Spiking: Die Berücksichtigung des Faktors Zeit .....	144
8.1.6	Spiking vs. Reservoir Computing.....	145
8.2	Erstaunliche Erfolge .....	146
8.2.1	Go-Weltklassespieler besiegt.....	146
8.2.2	AlphaZero: Menschen beim Spiel weit überlegen .....	147
8.2.3	KI schlägt Poker-Profis haushoch .....	148
8.3	Fazit KNN-Entwicklungen.....	148
8.3.1	Zukunft mit spiking neural networks?.....	150
<b>9</b>	<b>Neuromorph der Biologie näher – aber nicht gleich .....</b>	<b>152</b>
9.1	Informationsspeicherung und -verarbeitung an einem Ort.....	152
9.2	Weg von der Taktrate: Mit SNN Impulse nur bei Bedarf.....	153
9.3	Reverse engineering vs. Black box: Beispiel Blue Brain.....	154
9.3.1	Henry Markrams radikaler Ansatz.....	154
9.3.2	Mit SyNAPSE Milliarden Neuronen simuliert?.....	155
9.4	European Institute for Neuromorphic Computing – und Karlheinz Meier.....	157
<b>10</b>	<b>Neuromorph: Die elektronischen Chips .....</b>	<b>160</b>
10.1	Physikalische Grundlage neuromorpher Schaltungen: Das Hodgkin-Huxley-Modell .....	160
10.2	SpiNNaker in Manchester.....	161
10.3	Hicann-Chip für BrainScaleS 2.....	162
10.3.1	Prozessor-Einheiten für Plastizität.....	163
10.3.2	Kleinskalige Backpropagation.....	164

10.3.3	Lernen ähnlich der Biologie – nur effizienter.....	165
10.3.3.1	<i>Vorwissen und Rückkopplungen.....</i>	<i>166</i>
10.4	Die Konkurrenz schläft nicht: TrueNorth .....	167
10.5	Loihi-Chip: Neuro-Hardware vor dem Ausbruch? .....	167
10.5.1	Massive Erweiterung auf Hamsterhirn-Größe .....	169
10.5.2	Lernen aus einem Beispiel.....	169
10.6	Technologietreiber: Autonomes Fahren .....	170
10.6.1	Edge-Computing: Schnell und vor Ort.....	170
10.6.2	Der Akida-Chip für die Autoindustrie.....	170
10.6.3	Neuromorphe Sensorik .....	171
10.6.4	Insightness und SynSense: Beide aus Zürich.....	171
10.6.5	Französisches Prophesee kooperiert mit Sony .....	172
10.7	Nicht unbedingt neuromorph: Vom Grafik-Chip zur TPU .....	173
10.7.1	Nervana, Habana und der teils analoge Mythic-Chip.....	174
10.7.2	Rekordgröße: Der Cerebras-Chip .....	175
10.7.3	„Google-Ableger“ Groq, Volta und Ampere, Colossus .....	175
10.8	KI-Chips in China.....	177
<b>11</b>	<b>Memristoren: Eine lange Entwicklung.....</b>	<b>180</b>
11.1	Eine Hardware, die sich ändert .....	181
11.2	Computer mit Memristor-Prinzipien .....	182
11.2.1	The Machine.....	182
11.2.2	Dot Product Engine .....	184
11.3	Aufbau von Memristoren .....	184
11.4	Probleme bei Memristoren.....	185
11.5	Frühe Erfolge.....	187
11.6	Memristoren in der Computerforschung .....	188
11.6.1	Biologie-nahe Eigenschaften.....	189
11.6.2	Hopfield-Netze mit Memristoren.....	190
11.6.3	Ternär arbeitender Memristor-Chip .....	190
11.6.4	Bemerkenswertes aus Plastik .....	191
11.6.5	Pili von Bakterien: Prototypen für Drähte .....	192
11.6.5.1	<i>Protein-Nanodrähte als Memristoren.....</i>	<i>193</i>
11.6.6	Eine selbstorganisierende Computerarchitektur mit Memristoren .....	195
11.6.6.1	<i>Chipspannung vermindern – Energie sparen.....</i>	<i>197</i>
11.6.7	Beispiele für Probleme, die sich selbstorganisierend memristiv lösen lassen .....	198

11.6.7.1	Das Labyrinth-Problem – und das Netz der Londoner U-Bahn .....	198
11.6.7.2	Wettervorhersage und Weltall-Evolution.....	200
11.6.7.3	Vom Segen des Rauschens .....	201
11.6.7.4	Motorkontrolle und Robotik.....	202
11.6.7.5	Interface zwischen natürlichen Neuronetzen und Computern.....	202
11.7	Der Markt für Memristoren .....	202
<b>12</b>	<b>Licht neuromorph lenken: Photonische Schaltungen.....</b>	<b>204</b>
12.1	Relative Größe, wenig Wechselwirkung.....	204
12.1.1	Ausweg Plasmonen.....	204
12.1.1.1	Optischer Transistor bei Raumtemperatur .....	205
12.1.1.2	Ausweg Ringresonator.....	207
12.1.1.3	Entwicklungs-Beispiele von photonischen integrierten Schaltungen .....	207
12.1.2	Laser auf Siliciumbasis .....	208
12.2	Bezug zur Biologie: Besondere Eignung photonischen Rechnens für Neuronetze .....	209
12.2.1	Wenig Leistung pro Recheneinheit – und millionenfach schneller .....	209
12.2.1.1	Dennard-Skalierung: Viele Rechenkerne sind keine Lösung.....	210
12.2.1.2	Sehr sparsam ist der Spiking-Ansatz .....	210
12.2.1.3	Photonik ist noch millionenfach schneller .....	211
12.2.1.4	Unterhalb des Landauer-Limits .....	212
12.2.2	Ein neuromorpher photonischer Chip.....	212
12.2.2.1	Probleme: Materialstabilität und Lichtleitung.....	214
12.2.3	Photonisches Reservoir-Computing.....	215
<b>13</b>	<b>Quantenmechanik – Schwarze Körper, Doppelspalten, Verschränkung ....</b>	<b>216</b>
13.1	Geschichte der Quantenmechanik: Erste Hinweise.....	216
13.1.1	Der Schwarze Körper .....	216
13.1.2	Photoelektrischer Effekt.....	217
13.1.3	Die Postulierung des Quant.....	218
13.1.3.1	Die Bezeichnung „Quantum“ .....	219
13.1.4	Einsteins Revolution: Welle-Teilchen-Dualismus .....	220
13.1.5	Das Bohrsche Atommodell.....	221
13.2	Der Geschichte zweiter Teil: Die Etablierung der Quantenmechanik.....	222
13.2.1	Schrödinger und Heisenberg: Wahrscheinlich statt gewiss .....	222
13.2.2	Das mysteriöse Doppelspaltexperiment.....	223
13.2.2.1	Interferenz nur bei Unkenntnis .....	224
13.2.3	Wirkt der Quantenradierer rückwärts? .....	224



13.3	Der Geschichte dritter Teil: Quantenmechanik der Felder .....	226
13.4	Interpretationen der Quantenmechanik .....	227
13.4.1	Die Kopenhagener Deutung .....	228
13.4.2	Die Viele-Welten-Interpretation .....	229
13.5	Unerklärlich – aber wichtig für Quantencomputer: Verschränkung und Dekohärenz .....	229
13.5.1	Wechselwirkende Quantensysteme sind eins .....	230
13.5.2	Dekohärenz als Störfaktor – oder Übergang in die makroskopische Welt .....	230
<b>14</b>	<b>Attraktive Quantencomputer .....</b>	<b>232</b>
14.1	Etwas Quantencomputer-Historie und das Prinzip .....	232
14.1.1	Motivation durch den Shor-Algorithmus .....	232
14.1.2	Wie Quanten Zahlen darstellen .....	233
14.1.3	Fünf Anforderungen an den Bau – zwei besonders schwer .....	234
14.1.4	Komplexe Fehlerkorrektur .....	235
14.2	Realisierungsmöglichkeiten für Quantencomputer .....	236
14.2.1	Ionenfallen: Qubits in der Falle .....	236
14.2.2	Quantenpunkte: Vermittler zum Licht .....	237
14.2.3	SQUIDs und Kernspins – gerne in Diamanten .....	238
14.2.4	Photonen vermitteln .....	239
14.2.5	Quantenannealer: Abkühlen simulieren .....	239
14.3	Frühere und aktuelle technische Entwicklungen .....	241
14.4	Geeignete Aufgabenstellungen .....	243
14.4.1	Der Shor-Algorithmus .....	243
14.4.2	Suchalgorithmen: Grover und der Taubenschlag .....	243
14.4.2.1	<i>Geburtstagsparadoxon .....</i>	<i>244</i>
14.4.3	Quantensimulation für die Quantenchemie .....	245
14.4.4	Quantenneuronale Netze .....	247
14.5	Photonische neuronale Quantencomputer .....	248
14.5.1	Photonischer Neurochip mit Millionen Neuronen – ein Entwurf .....	248
14.5.2	Xanadu und seine „Qumodes“ .....	249
14.5.3	PsiQuantum: Revolution oder „Secret Vaporware“? .....	249
14.6	Ausblick: Hohe Investitionen und ein internationales Rennen .....	251
14.6.1	Die Europäische Union gibt eine Milliarde Euro .....	251
14.6.2	Relativierung durch China et al. ....	252
14.6.3	IBM und Google optimistisch .....	252
14.6.4	China auf der Überholspur? .....	253

14.6.5	Quantenradar – auch in Österreich.....	254
<b>15</b>	<b>Spintronik: Wenn Magnetmomente wechselwirken .....</b>	<b>256</b>
15.1	Spin: Eine quantenmechanische Eigenschaft von Teilchen.....	256
15.1.1	Topologische Isolatoren.....	257
15.1.1.1	<i>Heusler-Verbindungen: Anders als ihre Elemente .....</i>	<i>257</i>
15.1.1.2	<i>Topologische Isolatoren: Gleichzeitig nicht- und supraleitend.....</i>	<i>258</i>
15.1.2	Skyrmionen sind Solitonen in Feldern .....	259
15.1.2.1	<i>Natürliche Solitonen: Pororoca, Morning Glory Cloud.....</i>	<i>259</i>
15.2	Spintronik auf Bauteilsuche.....	260
15.2.1	Forschung: Atome kontrollieren.....	260
15.2.2	Skyrmion-Röhren identifiziert .....	261
15.2.3	Auf dem Weg in die Technik: Tunnelwiderstände, Memristoren.....	262
15.3	Vor- und Nachteile von Spintronik .....	263
15.3.1	Oszillationen zwischen Neuronen – natürlich und künstlich.....	264
15.3.2	(Noch) die Nachteile: Signale wenig deutlich, Forschungsbedarf .....	264
<b>16</b>	<b>Funken der Schöpfung: Selbstorganisation und Emergenz .....</b>	<b>266</b>
16.1	Selbstorganisation oder Emergenz? .....	266
16.1.1	Emergenz ohne Selbstorganisation.....	267
16.1.1.1	<i>Druck durch Heliumatome im Fulleren .....</i>	<i>267</i>
16.1.2	Selbstorganisation ohne Emergenz.....	268
16.1.3	Oftmals ein kombiniertes Auftreten.....	268
16.2	Ordnung und Chaos .....	269
16.2.1	Chaos-Kriterium Periodenverdopplung .....	270
16.2.1.1	<i>Das Elektron am Rande des Weltalls, Billard und Lotto .....</i>	<i>270</i>
16.3	Musterentstehung aus Chaos.....	270
16.3.1	Mandelbrotmenge .....	270
16.3.2	Attraktoren .....	271
16.3.3	Energy Dissipation Pathways .....	271
16.3.3.1	<i>Constructal Theory gegen Gleichmacherei .....</i>	<i>273</i>
16.4	Quantenchaos, Determinismus, Zufall.....	273
16.5	Nichtlinearitäten .....	274
16.5.1	Statische nichtlineare Systeme.....	274
16.5.2	Dynamische nichtlineare Systeme.....	275
16.5.3	Positive Rückkopplung .....	275

16.6	Synergetik: Wenn Ordnungsparameter versklaven.....	275
16.6.1	Beispiel Laser .....	275
16.6.2	Beispiel Konvektion.....	277
16.6.3	Weitere Beispiele.....	279
16.6.4	Erste Ideen schon von Ilya Prigogine.....	279
16.7	Schwarmbildung .....	279
16.7.1	Bottom up- und Top down-Prozesse .....	279
16.8	Geführte Selbstorganisation.....	280
16.8.1	Flüssigkristallbildung steuern .....	280
16.8.1.1	<i>Bottom up-/Top down-Materialdesign.....</i>	<i>282</i>
16.9	Selbstorganisation in der Biologie.....	282
16.9.1	Schleimpilzintelligenz entschlüsselt.....	282
16.10	Weiter geblickt.....	284
<b>17</b>	<b>Die Evolution: Theorien und Befunde .....</b>	<b>286</b>
17.1	Ein kurzer Blick in die Geschichte der Evolution.....	286
17.1.1	Von Lamarck nach Darwin, Charles.....	287
17.1.1.1	<i>Erasmus Darwin: Zoonomia.....</i>	<i>287</i>
17.1.2	Ein Ausgangspunkt für Charles Darwin.....	287
17.2	Neuere Theorien zur Evolution .....	289
17.2.1	Konvergenztheorie: Wat mutt, dat mutt .....	289
17.2.2	Kontingenztheorie: Der Zufall hat das Sagen .....	290
17.2.2.1	<i>Konvergenztheorie vs. Kontingenztheorie.....</i>	<i>291</i>
17.2.3	Synthetische Evolutionstheorie des Julian Huxley .....	291
17.2.3.1	<i>Evolutionärer Humanismus.....</i>	<i>292</i>
17.2.4	Extended Evolutionary Synthesis, EES .....	293
17.2.5	Gerichtete Entwicklung.....	296
17.2.6	Dissipations-getriebene Anpassung .....	296
17.2.7	Evolutionäre Entwicklungsbiologie (Evo-Devo) .....	297
<b>18</b>	<b>Die Evolution: Mechanismen und Zukunft – natürlich künstlich ;-)</b> .....	<b>300</b>
18.1	Fit sein heißt: Optimiert für Nachkommen .....	300
18.1.1	Überleben der Stärksten ist falsch .....	300
18.1.2	Gesamtfitness erklärt Altruismus .....	301
18.2	Mechanismen schneller Anpassung .....	302
18.2.1	Neue Gene „aus dem Nichts“ .....	302

<b>18.2.2</b>	<b>Genverdopplung als Beschleuniger .....</b>	<b>303</b>
18.2.2.1	<i>Nicht nur bei Vertebraten .....</i>	303
18.2.2.2	<i>Genverdopplung bei Pflanzen .....</i>	303
<b>18.2.3</b>	<b>Lohnt sich Sex als Evolutionsbeschleuniger?.....</b>	<b>305</b>
<b>18.3</b>	<b>Stabilität vs. Variabilität.....</b>	<b>306</b>
<b>18.3.1</b>	<b>Komplexität als Entwicklungskriterium .....</b>	<b>306</b>
<b>18.3.2</b>	<b>Robust und trotzdem entwicklungsfähig.....</b>	<b>306</b>
<b>18.3.3</b>	<b>Gesetzmäßige Veränderung.....</b>	<b>307</b>
<b>18.4</b>	<b>Von Vielfalt (fast) zur Einfalt .....</b>	<b>308</b>
<b>18.4.1</b>	<b>Von Sternenschiffen und Geparden .....</b>	<b>308</b>
<b>18.5</b>	<b>Ausblick: Genetik, Erfahrung, Gesellschaft, Technik .....</b>	<b>308</b>
<b>18.5.1</b>	<b>Aktuelles Forschungsgebiet Epigenetik.....</b>	<b>310</b>
18.5.1.1	<i>Traumata über Generationen nachweisbar .....</i>	310
18.5.1.2	<i>Verhalten von Haustieren .....</i>	311
<b>18.5.2</b>	<b>Gerichtete Evolution .....</b>	<b>311</b>
<b>18.5.3</b>	<b>Gesellschaft, Technik, Information, Universum .....</b>	<b>313</b>
<b>18.5.4</b>	<b>Evolution hat kein Ziel .....</b>	<b>316</b>
18.5.4.1	<i>Moral vs. Ethik .....</i>	316
<b>19</b>	<b>Mit DNA rechnen, Minihirne im Bioreaktor: Bio-basierte Computer .....</b>	<b>318</b>
19.1	Informationen in künstlicher DNA speichern.....	318
19.1.1	Davos Bitcoin Challenge .....	319
19.2	Rechnen mit künstlicher DNA.....	319
19.2.1	Lösung des Handlungsreisenden-Problems per DNA.....	320
19.2.2	Aktuelle Forschung: EU-Projekt Bio4Comp.....	322
19.2.2.1	<i>Künstliches Neuronetz aus DNA.....</i>	323
19.3	Minigehirne aus dem Bioreaktor .....	323
<b>20</b>	<b>Was ist Information?.....</b>	<b>326</b>
20.1	Mehrere Ebenen der Information .....	326
20.1.1	Definition nach Shannon .....	326
20.1.2	Information und Energie – Maxwells Dämon .....	327
20.1.2.1	<i>Das Landauer-Prinzip.....</i>	328
20.2	Grenzen der Erkenntnis.....	330
20.2.1	Relativitätstheorie gegen Quantentheorie.....	331
20.2.2	Quantenverschränkung und Wurm Löcher .....	331

20.3	Zum unterhaltsamen Nachdenken: Ästivations-Hypothese .....	331
<b>21</b>	<b>Wie Information wandert: fünf Thesen .....</b>	<b>334</b>
21.1	These 1: Natur und Technik – zwei Seiten einer Medaille .....	334
21.2	These 2: Ein genügend komplexes Substrat kann ein Bewusstsein beherbergen .....	336
21.3	These 3: Wenn ein Bewusstsein möglich ist, entwickelt sich auch ein Bewusstsein.....	338
21.3.1	Inhomogenität als Lebensquell.....	338
21.3.2	Eine komplexe Struktur ist ein „Schwamm“ für Informationen.....	340
21.3.3	Zusammengeschaltete Gehirne .....	340
21.4	These 4: Im Laufe der Evolution vergrößert sich die Differenzierung von Objekten, Strukturen, Prozessen.....	342
21.5	These 5: Systeme mit hohem Informationsfluss entwickeln sich besonders gut.....	343
21.5.1	Künstliches Bewusstsein – in Arbeit? Überbewusstsein? .....	343
<b>22</b>	<b>Eine kurze Spekulation über die weitere Zukunft.....</b>	<b>346</b>
22.1	Die Sicht von Elon Musk auf künstliche Intelligenz .....	346
22.2	Kommt der Transhumanismus? .....	346
22.3	Handlungsdirektiven .....	351
22.4	Die Erde als Denkmaschine .....	352
22.4.1	Ein multiples Bewusstsein, einsam mit sich selbst beschäftigt? .....	354
<b>23</b>	<b>Anhang.....</b>	<b>356</b>
23.1	Literaturquellen .....	356
23.2	Abbildungsquellen .....	366
23.3	Stichwortverzeichnis .....	372
23.4	Die Zeitschrift CLB.....	377
23.5	Zum Autor .....	378