



Aras Mirfendreski

# Künstliche Intelligenz für die Entwicklung von Antrieben

Historie, Arbeitsprozesse, Konzepte,  
Methoden und Anwendungsbeispiele



Springer Vieweg

---

# Künstliche Intelligenz für die Entwicklung von Antrieben

---

Aras Mirfendreski

# Künstliche Intelligenz für die Entwicklung von Antrieben

Historie, Arbeitsprozesse, Konzepte,  
Methoden und Anwendungsbeispiele

Aras Mirfendreski  
Köln, Deutschland

ISBN 978-3-662-63494-3      ISBN 978-3-662-63495-0 (eBook)  
<https://doi.org/10.1007/978-3-662-63495-0>

Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über <http://dnb.d-nb.de> abrufbar.

© Der/die Herausgeber bzw. der/die Autor(en), exklusiv lizenziert durch Springer-Verlag GmbH, DE, ein Teil von Springer Nature 2022

Das Werk einschließlich aller seiner Teile ist urheberrechtlich geschützt. Jede Verwertung, die nicht ausdrücklich vom Urheberrechtsgesetz zugelassen ist, bedarf der vorherigen Zustimmung des Verlags. Das gilt insbesondere für Vervielfältigungen, Bearbeitungen, Übersetzungen, Mikroverfilmungen und die Einspeicherung und Verarbeitung in elektronischen Systemen.

Die Wiedergabe von allgemein beschreibenden Bezeichnungen, Marken, Unternehmensnamen etc. in diesem Werk bedeutet nicht, dass diese frei durch jedermann benutzt werden dürfen. Die Berechtigung zur Benutzung unterliegt, auch ohne gesonderten Hinweis hierzu, den Regeln des Markenrechts. Die Rechte des jeweiligen Zeicheninhabers sind zu beachten.

Der Verlag, die Autoren und die Herausgeber gehen davon aus, dass die Angaben und Informationen in diesem Werk zum Zeitpunkt der Veröffentlichung vollständig und korrekt sind. Weder der Verlag noch die Autoren oder die Herausgeber übernehmen, ausdrücklich oder implizit, Gewähr für den Inhalt des Werkes, etwaige Fehler oder Äußerungen. Der Verlag bleibt im Hinblick auf geografische Zuordnungen und Gebietsbezeichnungen in veröffentlichten Karten und Institutionsadressen neutral.

Planung/Lektorat: Markus Braun

Springer Vieweg ist ein Imprint der eingetragenen Gesellschaft Springer-Verlag GmbH, DE und ist ein Teil von Springer Nature.

Die Anschrift der Gesellschaft ist: Heidelberger Platz 3, 14197 Berlin, Germany

---

# Inhaltsverzeichnis

- 1 Einleitung** ..... 1
- 2 Der Verbrennungsmotor in der Industrialisierungswende** ..... 5
  - 2.1 Die Vorgeschichte ..... 5
  - 2.2 Die technologische Revolution ..... 8
- 3 Revolution durch Simulation in der Antriebsentwicklung** ..... 11
  - 3.1 Strömungsberechnung ..... 11
    - 3.1.1 3D-CFD ..... 12
    - 3.1.2 1D-CFD ..... 16
    - 3.1.3 0D-CFD ..... 17
  - 3.2 Elastohydrodynamik (EHD) und Tribologie ..... 21
  - 3.3 Brennraum (Verbrennung und Thermodynamik) ..... 25
  - 3.4 Materialfestigkeit und Strukturdynamik ..... 36
    - 3.4.1 Elastizitätstheorie ..... 39
    - 3.4.2 Alternative Methoden ..... 46
  - 3.5 Akustik ..... 49
- 4 Big Data für Antriebe** ..... 53
  - 4.1 Antriebskonzepte der Zukunft ..... 53
  - 4.2 Historie der Simulation ..... 59
  - 4.3 Entwicklungsprozesse und Szenarien der Simulation mit Big-Data ..... 64
- 5 Künstliche Intelligenz für die Entwicklung von Antrieben** ..... 83
  - 5.1 Modelle künstlicher Intelligenz (KI) ..... 84
  - 5.2 Übersicht: Ebenen der KI ..... 91
  - 5.3 Suchbaum (Search Tree) ..... 93
  - 5.4 Machine Learning ..... 99
    - 5.4.1 Supervised Learning ..... 101
    - 5.4.2 Unsupervised Learning ..... 106
    - 5.4.3 Reinforcement Learning ..... 111

---

5.5	Artificial Neural Network (ANN) .....	116
5.5.1	Aktivierungsfunktion .....	119
5.5.2	Feed-Forward Netzwerke (ANN) und Recurrent Netzwerke (RNN) .....	120
5.5.3	Trainingsverfahren .....	128
5.5.4	Netzwerk Architektur und Performance .....	137
5.5.5	Fuzzy Logik .....	144
5.6	Deep Learning .....	147
5.6.1	Convolutional Neural Network (CNN) .....	148
5.6.1.1	Image Recognition .....	148
5.6.1.2	Sound Recognition .....	159
5.6.2	Generative Adversarial Network (GAN) .....	165
5.7	Software .....	169
	<b>Literatur</b> .....	173

---

## Abbildungsverzeichnis

Abb. 3.1	Einsatzgebiete der Simulation in der Antriebsentwicklung . . . . .	12
Abb. 3.2	Zustandsgrößen, Stoff- und Energieströme eines Behältermodells . . . .	19
Abb. 3.3	Ausflussfunktion in Abhängigkeit von Isentropenexponent und Druckverhältnis . . . . .	20
Abb. 3.4	Beispiele von EHD-geschmierten Kontakten . . . . .	21
Abb. 3.5	Stribeck-Kurve: Auswirkung des Schmierfilms auf den Reibkoeffizienten zweier Materialien . . . . .	23
Abb. 3.6	Koordinatensystem im Kontaktpunkt zweier Körper . . . . .	24
Abb. 3.7	Physikalisch/chemische Prozessabfolgen im Zylinder . . . . .	26
Abb. 3.8	Abgas Gleichgewichtszusammensetzung Kraftstoff $C_8H_{18}$ . . . . .	32
Abb. 3.9	Partielles Gleichgewicht am Beispiel des erweiterten Zeldovich Mechanismus . . . . .	34
Abb. 3.10	Geometrie des Kurbeltriebs . . . . .	36
Abb. 3.11	2D und 3D finite Elemente mit linearer, quadratischer und kubischer Verformung . . . . .	38
Abb. 3.12	Finite Elemente mit unterschiedlicher Netztiefe (2D Fläche) . . . . .	39
Abb. 3.13	Kräftebilanz an einem Körper . . . . .	40
Abb. 3.14	Dehnung eines Körpers . . . . .	41
Abb. 3.15	Schubverformung eines Körpers . . . . .	42
Abb. 3.16	Querkontraktion eines Körpers . . . . .	43
Abb. 3.17	Anzahl an Knoten pro Körperkante durch eine Verformungsfunktion . . . . .	45
Abb. 3.18	Verschiebung aller Knoten eines Körpers dargestellt durch den Verschiebungsvektor $\{d_i\}$ . . . . .	45
Abb. 3.19	Zeit- und Frequenzspektrum durch Überlagerung harmonischer Signale . . . . .	51
Abb. 4.1	Emissionsgrenzen nach der Euro-Abgasnorm . . . . .	55

Abb. 4.2	Entwicklung der PKW-Neuzulassungen nach Antrieben in Deutschland bis 2040 .....	56
Abb. 4.3	Entwicklung des Verbrennungsmotors anteilig an allen PKW-Neuzulassungen .....	57
Abb. 4.4	Entwicklung des PKW-Flottenbestandes nach Antrieben in Deutschland bis 2040 .....	58
Abb. 4.5	Historie der konventionellen Simulationstools für allgemeine Anwendungen .....	60
Abb. 4.6	Historie der konventionellen Simulationstools für die Automobilbranche .....	61
Abb. 4.7	Entwicklungstrend aller Simulationssoftwareprodukte .....	62
Abb. 4.8	Entwicklung der Emissionsgrenzwerte seit Einführung der Abgasnorm .....	63
Abb. 4.9	Spezifische CO <sub>2</sub> - und NO <sub>x</sub> -Entwicklung seit Einführung von Abgasnormen .....	63
Abb. 4.10	Spezifische CO <sub>2</sub> -Flottenentwicklung seit Einführung von CO <sub>2</sub> -Grenzwerten .....	64
Abb. 4.11	Merkmale von Daten (Big-Data) .....	65
Abb. 4.12	Prototyporientierter/testbasierter Entwicklungsprozess von Antrieben bis in die 1970er Jahre .....	66
Abb. 4.13	Simulationsorientierter Entwicklungsprozess von Antrieben heute .....	68
Abb. 4.14	Historische Veränderung von Entwicklungsprozessen durch die Simulation .....	69
Abb. 4.15	Generierung von Big-Data durch Realdaten oder durch Simulationssoftware .....	70
Abb. 4.16	Trade-off zwischen Detaillierungsebene und Modellgenauigkeit: KI-Simulation im Vergleich zur klassischen Simulation .....	71
Abb. 4.17	Serielle Aufgaben vs. parallele Aufgaben .....	71
Abb. 4.18	Geschwindigkeitsvergleich GPU vs. CPU .....	72
Abb. 4.19	Gadgetting Prozess: Rationalisierung aller Simulationstools auf das stärkste Tool in seiner jeweiligen Disziplin, Erweiterung der Entwicklungslandschaft durch KI-Gadgets .....	73
Abb. 4.20	Gadgetting-Teilkonzept: KI-Gadgets zur Unterstützung der Kalibration .....	74
Abb. 4.21	Klassischer Vorgang einer Modellkalibrierung und Modellanwendung als Datengenerator .....	74
Abb. 4.22	Methode zur Big-Data-Generierung und Erstellung von KI-Gadgets .....	75
Abb. 4.23	Entwicklungsprozess zur Herstellung eines Prototypen: Gadgetting Teilkonzept .....	76



Abb. 4.24	Gadgeting-Vollkonzept: KI-Gadgets als Ergebnislieferanten . . . . .	77
Abb. 4.25	Entwicklungsprozess zur Herstellung eines Prototypen: Gadgeting-Vollkonzept. . . . .	77
Abb. 4.26	Submodelle in der Entwicklung und Simulation von Verbrennungsmotoren. . . . .	78
Abb. 4.27	Verschiedene DoE-Ansätze zur Erstellung eines Versuchsraums . . . . .	79
Abb. 4.28	Integration von KI in den V-Entwicklungsprozess für das Automobil. . . . .	80
Abb. 5.1	Singularität . . . . .	88
Abb. 5.2	Anteil der KMU (SME) und GU (LE), die bereits mindestens in geringem Umfang KI-Technologien einsetzen . . . . .	90
Abb. 5.3	KMU (SME) und GU (LE), die anteilig davon mit externen KI-Anbietern arbeiten . . . . .	90
Abb. 5.4	Anteil der KMU (SME) und GU (LE), die heute und voraussichtlich in fünf Jahren mindestens in geringem Umfang KI-Technologien einsetzen werden . . . . .	91
Abb. 5.5	Flow-Chart: Detaillierungsebenen der künstlichen Intelligenz . . . . .	92
Abb. 5.6	Suchbaumstruktur. . . . .	93
Abb. 5.7	Suchbaum durch heuristische Abwärtsstrategie (HAS) . . . . .	94
Abb. 5.8	Optimierung von Applikationsparametern eines Magerkonzeptmotors mithilfe der Suchbaum-Methode. . . . .	96
Abb. 5.9	Systemische Darstellung eines parallel-seriellen Hybrid-Antriebsstrangs . . . . .	97
Abb. 5.10	Transiente Anwendung des Suchbaums: Optimierung einer Hybrid Betriebsstrategie im WLTC . . . . .	99
Abb. 5.11	Traditional programming vs. Machine learning. . . . .	100
Abb. 5.12	Lernmethoden für das Machine Learning . . . . .	101
Abb. 5.13	Klassifikation und Regression von Daten. . . . .	102
Abb. 5.14	Observer für das Supervised Learning Verfahren. . . . .	103
Abb. 5.15	Observer kombiniert mit einem physikalischen Modell. . . . .	103
Abb. 5.16	Klassifikation von thermokinetischen Daten (Reynoldzahl) . . . . .	104
Abb. 5.17	Motormodell nach Vorbild von Steuergerätemodellen. . . . .	105
Abb. 5.18	Regression von thermokinetischen Daten (Reynoldzahl). . . . .	106
Abb. 5.19	Clustering und Association von Daten für das Unsupervised Learning Verfahren . . . . .	107
Abb. 5.20	Interpreter für das Unsupervised Learning Verfahren . . . . .	108
Abb. 5.21	Normalverteilung von Messausreißern (Quantization Error) eines Datensatzes . . . . .	108

Abb. 5.22	Datenselektion für zwei unterschiedliche Quanization Error Schwellwerte . . . . .	109
Abb. 5.23	Brennstoffzelle: Gruppierung von Wirkungsgradklassen. . . . .	110
Abb. 5.24	Clustering zur Untersuchung eines Stahls mit Nickel-Chrom-Molybdän Legierung nach Materialversagen. . . . .	111
Abb. 5.25	Agent für das Reinforcement Learning Verfahren . . . . .	112
Abb. 5.26	Statischer Regelkreis zur Steuerung der Fahrgeschwindigkeit im Fahrzyklus. . . . .	113
Abb. 5.27	Adaptiver Regelkreis durch Reinforcement Learning . . . . .	114
Abb. 5.28	Adaptive RDE-Geschwindigkeitsregelung. . . . .	115
Abb. 5.29	Reinforcement Learning angewendet am Chassis-Design . . . . .	116
Abb. 5.30	Arbeitsweise heutiger Computer-Architekturen nach Neumann . . . . .	117
Abb. 5.31	Komponenten eines neuronalen Netzwerks . . . . .	118
Abb. 5.32	Aktivierungsfunktionen . . . . .	119
Abb. 5.33	Schematische Darstellung von internen Verarbeitungsprozessen zwischen zwei verbundenen Neuronen . . . . .	120
Abb. 5.34	Feed-Forward ANN mit 3 Ebenen: Hinton-Diagramm mit reiner Feed-Forward Formation und zusätzlichen Direktverbindungen zwischen Ein- und Ausgang . . . . .	121
Abb. 5.35	Feed-Forward ANN mit selbst ausgerichteten Recurrent Schleifen der Neuronen und fremd ausgerichteten Recurrent Schleifen . . . . .	122
Abb. 5.36	Feed-Forward ANN mit Recurrent Schleifen nur innerhalb der Layer und vollständig vernetztes Netzwerk . . . . .	123
Abb. 5.37	Vorhersage zeitlich variabler Größen: Definition von past time step und future time step . . . . .	124
Abb. 5.38	Zusammenführung sequentieller RNNs zur Verarbeitung zeitbasierter Ereignisse . . . . .	124
Abb. 5.39	Funktionsweise einer LSTM-Zelle. . . . .	125
Abb. 5.40	Training und Vorhersage von CO, NO <sub>x</sub> Emissionen im RDE Prüfverfahren . . . . .	127
Abb. 5.41	Vorhersage von CO und NO <sub>x</sub> im RDE für unterschiedliche future times steps N <sub>f</sub> . . . . .	128
Abb. 5.42	Backward Propagation Trainingsphase 1: Feed-Forward und Herleitung einzelner Neuronenausgänge. . . . .	130
Abb. 5.43	Backward Propagation Trainingsphase 2: Herleitung der Fehler und der Gradienten . . . . .	131
Abb. 5.44	Backward-Propagation Trainingsphase 3: Update der Gewichte auf Basis der Gradienten . . . . .	132
Abb. 5.45	Neuronales Netzwerk für das Counter Propagation Trainingsverfahren . . . . .	134

Abb. 5.46	Projektion von Daten auf eine 2D Merkmalskarte (Self Organized Maps SOM) .....	136
Abb. 5.47	Leistungsfähigkeit eines ANN als Funktion von Datenmenge und Netzwerkarchitektur .....	138
Abb. 5.48	Sequentieller Aufbau eines neuronalen Netzwerks nach serieller Methode und paralleler Methode .....	138
Abb. 5.49	Training eines seriellen und parallelen Netzwerks. ....	139
Abb. 5.50	Effizienz einer Netzwerkdimension .....	140
Abb. 5.51	Anzahl zu wählender Hidden-Layer in Abhängigkeit von Datenmenge und Zahl an Eingangsgrößen .....	140
Abb. 5.52	Zahl zu wählender Hidden-Units in Abhängigkeit der Datenmenge ...	141
Abb. 5.53	Dropout von Neuronen .....	142
Abb. 5.54	Unterteilung eines Datensatzes in Batches. ....	143
Abb. 5.55	Training/Test vs. Epochen .....	143
Abb. 5.56	Temperaturempfinden bei einer Gruppe von Probanden .....	145
Abb. 5.57	Kombination von Fuzzy-Logik und einem neuronalen Netzwerk als hybrides System für 1. ANN als Datenlieferant und 2. Fuzzy-Logik als Datenlieferant .....	146
Abb. 5.58	Gewichtung unterschiedlicher Lastanteile eines Fahrzyklus mithilfe der Fuzzy-Logik .....	147
Abb. 5.59	Kaskadenstruktur eines CNN-Verfahrens. ....	149
Abb. 5.60	Konvertierung eines RGB-Pixelcodes durch einen Convolution-Filter (Faltungsprozess) .....	150
Abb. 5.61	Pooling-Verfahren zur Datenfilterung .....	151
Abb. 5.62	Geometrien dreier unterschiedlicher Kraftstoffinjektoren .....	153
Abb. 5.63	Optische Messungen der Einspritzung für unterschiedliche Injektor-Geometrien .....	153
Abb. 5.64	Verbrennungsoptik: Anwendung von Fluoreszenz-Filter zur Verstärkung von Bildmerkmalen: Diffusionsflamme und Rußbildung .....	154
Abb. 5.65	CNN zur Vorhersage spezifischer Größen (Turbulenz, Mischung, Emission, etc.) .....	154
Abb. 5.66	Trainingsphase einer Plattendurchströmung mit variabler Geometrie .....	155
Abb. 5.67	CNN zur Erzeugung zeitdiskreter Ausgaben von Strömungsergebnissen .....	156
Abb. 5.68	Validierung des CNN-Modells anhand von durchströmten Platten mit unterschiedlichen Einschnitten .....	156
Abb. 5.69	Plattenströmung mit zentraler, kreisförmiger Öffnung im Vergleich: CNN gegenüber 3D-CFD .....	157
Abb. 5.70	Plattenströmung mit zwei kreisförmigen Öffnungen auf der Querachse im Vergleich: CNN gegenüber 3D-CFD. ....	158

---

Abb. 5.71	Plattenströmung mit asymmetrischen Öffnungen im Vergleich: CNN gegenüber 3D-CFD . . . . .	159
Abb. 5.72	Klassische Tonerkennung: Sequentielle Extraktion einzelner Tonmerkmale . . . . .	160
Abb. 5.73	Sound Recognition: Sequentielle Extraktion einzelner Tonmerkmale durch CNN . . . . .	162
Abb. 5.74	Sound Recognition angewendet an das Frequenzspektrum eines Motors zum Erkennen Turbolader spezifischer Geräusche . . . . .	164
Abb. 5.75	Vergleich Kaskadenstruktur des Diskriminators und des Generators an mikroskopischen Bruchstrukturen eines Metallwerkstoffs . . . . .	165
Abb. 5.76	Arbeitsprozess des GAN . . . . .	166
Abb. 5.77	GAN zur extrem skalierbaren Generierung von Eingangsdaten für die Applikation von Antrieben . . . . .	168

---

# Tabellenverzeichnis

Tab. 5.1	Meilensteine der künstlichen Intelligenz . . . . .	89
Tab. 5.2	Datenprozessverarbeitung Gehirn vs. Computer . . . . .	117
Tab. 5.3	Open-Source-Software und Beispiele einiger Bibliotheken für die Anwendung von KI . . . . .	172



Wann haben wir eigentlich damit begonnen, alles um uns herum und nicht zuletzt uns selbst einer stetigen Optimierung zu unterziehen? Der Gedanke hinter dem Optimieren ist im Grunde seit Beginn der menschlichen Existenz vorhanden. Eine körperliche Handlung zu entlasten, die Geschwindigkeit einer Handlung zu erhöhen, um ihre Zeitdauer zu verkürzen, oder generell gesprochen, die Ausbeute und damit die Effizienz einer Handlung zu steigern sind Zeichen von Intelligenz und in unseren natürlichen Denkprozessen tief verankert. Im 18. Jahrhundert entstand aus einer Not heraus die landwirtschaftliche Revolution, weil die steigende Bevölkerung in Westeuropa nicht ausreichend mit Nahrungsmitteln versorgt werden konnte. Aufgrund dessen mussten innovative Prozesse entwickelt werden, um die Fruchtbarkeit der Böden zu erhöhen und den Ernteertrag zu steigern. Ein evolutionäres Zuchtverhalten verhalf, leistungsstärkere Nutztiere für die Landwirtschaft aufzuziehen oder Tiere mit erhöhtem Fleischanteil für den Konsum zu züchten. Diese Ära ging nahtlos über in die industrielle Revolution im 19. und 20. Jahrhundert. Durch die Entwicklung von Kraftmaschinen und Antrieben änderte sich die Einstellung zur körperlichen Arbeit. Neue Arbeitsgemeinschaften, wie sie durch Industrien geschaffen wurden sowie neue und engere Lebensformen entstanden, was die gesellschaftliche Vernetzung der Menschen förderte. Hierdurch gelang erstmalig der Aufstieg des Bürgertums, aus dem im weiteren Sinne ebenso eine Optimierung gesellschaftlicher Strukturen als Motivation hervorging.

Führt man die Folge unzähliger Errungenschaften bis in die heutige Zeit fort, so hat uns unser natürlicher Entwicklungstrieb auf eine hocheffiziente und hochtechnologische Ebene befördert, in der wir leben. Hat ein System sein Maß an Optimierung ausgeschöpft, ist es unausweichlich, auf alternative Systeme umzusteigen, um neue Geschäftsfelder zu erobern und sich auf dem hochdynamischen und kompetitiven Markt neu zu positionieren. Ist dies vielleicht ein Erklärungsansatz dafür, warum der Verbrennungsmotor einer Renaissance entgegensteht?

Antriebskonzepte der Zukunft werden die granularen Ansprüche der Gesellschaft als auch die strengen Vorgaben der Politik erfüllen müssen. Auf Basis anspruchsvoller Erwartungs-

haltungen bereitet sich die gesamte Automobilbranche kollektiv auf eine visionäre Zukunftslandschaft vor, um frühzeitig die richtigen Weichen zu stellen. Aus aktuellen Veröffentlichungen geht hervor, dass bis zum Jahr 2040 eine Vielfalt an Hybridvarianten den Neuzulassungsmarkt mit einem Anteil von 53 % bis 65 % abdecken soll. Die Konzepte lassen sich primär unterteilen in milde 48V-Hybride mit unterschiedlichen Antriebsstrang-Varianten ( $P_0 - P_4$  Topologie), klassische Vollhybride mit seriellem oder parallelem Antriebsstrang, Plug-in-Hybride bis hin zu Range-Extender, bei denen der Motor eine passive Rolle des Antriebs einnimmt. Zwischen 11 % und 15 % des Marktanteils sollen von reinen Elektrofahrzeugen abgedeckt werden, die restlichen 22 % bis 29 % verteilen sich auf reine Verbrennungsmotoren, die anteilig höher mit synthetischen Kraftstoffen (E-Fuels) und Bio-Fuels angetrieben werden sollen, sowie auf gas- und wasserstoffangetriebene Fahrzeuge.

Infolge der angestrebten und vielseitigen Antriebsvarianten werden die Entwicklungskosten der Automobilhersteller in den kommenden Jahren drastisch steigen. Verbrennungsmotoren haben bereits ein nahezu maximales Potenzial hinsichtlich ihres Wirkungsgrads und somit eines minimalen  $\text{CO}_2$ -Ausstoßes erreicht. Weitere Optimierungsversuche bringen inzwischen lediglich marginale Verbesserungen bei gleichbleibendem oder gar höherem Investitionsvolumen. Dies heißt aber keinesfalls, dass der Verbrennungsmotor so leicht zu ersetzen ist. Eines ist allerdings sicher – Investitionstrends für die Entwicklung von Verbrennungsmotoren werden in dieser Form, so wie in den letzten Jahrzehnten, keinen Bestand mehr haben. Eine Investitionsgrundlage infolge vielseitigerer Antriebskonzepte ist zukünftig nur gewinnbringend, sofern deutlich schlankere Entwicklungsprozesse und effizientere Methoden die derzeitigen ablösen.

Hierfür steht zum richtigen Zeitpunkt ein wertvolles Werkzeug zur Hand: die künstliche Intelligenz (KI). KI ist ein Wissens- und Forschungsgebiet, mit dem sich die letzten Jahrzehnte primär Computerwissenschaftler auseinandergesetzt haben. Ihre bereits jetzt vielseitigen Anwendungsgebiete haben sich dementsprechend in der Welt der IT-Branche verankert und die Digitalisierungswende seit den 1970er Jahren maßgeblich nach vorne bewegt. Inzwischen sind die Themenfelder der KI vielseitig, zuverlässig und hocheffizient. Wie nur sollen Themen dieser digitalen IT-Branche auf industrielle Entwicklungsfelder übertragbar sein?

Der Begriff künstliche Intelligenz wird im Volksmund inflationär verwendet und vermittelt derweil eher ein Image oder ein Gefühl darüber, dass ein gewisser Prozess clever, maschinell und selbstlernend durchgeführt werden kann. Dieses Buch ist als Konzeptbuch gedacht und dient zur Konkretisierung der Einsatzmöglichkeiten der KI für industrielle Anwendungen. Es zielt darauf ab, Themenfelder der KI in ihrer gesamten Komplexität vorzustellen sowie konzeptionelle und kreative Ideen zu vermitteln, wie sie in der Antriebsentwicklung gewinnbringend eingesetzt werden können. Hiervon sollen Ingenieure mit dem Schwerpunkt Antriebsentwicklung profitieren, die sich mit den Möglichkeiten und Ebenen der KI in diesem wissenschaftlichen Kontext stärker auseinandersetzen möchten. Ebenso

---

wird dieses Buch KI-Anwendern und IT-Experten empfohlen, die keinen klassischen Ingenieurshintergrund besitzen und einen Überblick darüber erlangen möchten, in welcher Form ihre wertvollen Techniken für die Themenfelder der Antriebsentwicklung konkrete Anwendungen finden können.

Aras Mirfendreski



# Der Verbrennungsmotor in der Industrialisierungswende

## 2

### 2.1 Die Vorgeschichte

Die Industrialisierung veränderte die Welt. Sie setzte im späten 18. Jahrhundert ein und initiierte einen revolutionären Wandel durch Technologie. Die Veränderung folgte abrupt und unvorbereitet und stellte jahrhundertealte und bewährte Strukturen auf unterschiedlichen Ebenen in Frage. Sie schien eine außergewöhnliche Macht zu besitzen und war in der Lage, die Landwirtschaft, den Handel, den Transport, die Textilproduktion, das Wohnen, die Politik, Kultur und nicht zuletzt die komplette Gesellschaft zu erneuern.

Die Notwendigkeit der Industrialisierung wurde zunächst durch die landwirtschaftliche Revolution, auch Agrarrevolution genannt, bestimmt. Diese fand zwischen 1760 und 1815 statt und ermöglichte Bauern durch maßgebliche technische Modernisierungen in Feld- und Viehwirtschaft ein deutliches Wachstum in der Nahrungsmittelproduktion zu erzielen. Westeuropa und speziell Großbritannien waren zu diesem Zeitpunkt traditionelle Handelsregionen. Die Kombination aus stetig steigender Bevölkerungsdichte und schlechtem Ackerland zwang die Landwirte zu einer effizienteren Bewirtschaftung und der Entwicklung neuer Methoden, um ihre Produktivität zu steigern. Im **Ackerbau** wurde das weidende Vieh als Düngelieferant für Weideflächen genutzt, wodurch sich die Fruchtbarkeit von Getreidefeldern erhöhte. Durch den Anbau neuer Feldfrüchte, die den Nahrungsmittelkreislauf zwischen Mensch und Vieh gleichermaßen bedienten, sowie durch den Anbau neuer und robuster Grassorten, die nicht nur schneller wuchsen, sondern auch dem Boden weniger Nährstoffe entzogen, wurden große Erfolge in der effizienten Bewirtschaftung von Feldern erzielt.

Im Bereich **landwirtschaftlicher Technologien** wurde zu Beginn des 18. Jahrhunderts die Saatmaschine erfunden, die das schweißtreibende Pflügen und Sähen von Menschenhand ersetzte. Durch diese Maschine konnte die Aussaat auf Felder nicht nur mit erheblicher Zeitersparnis erfolgen, sondern sie war auch in der Lage, die Ernte durch die Präzision der eingebrachten Saatmenge mit gleichmäßigen Abständen zu erleichtern und dadurch die

Effizienz zu steigern. Zu den weiteren technischen Erneuerungen zählten eine von Jethro Tull um 1708 vorgestellte, von Pferden gezogene Hacke, die zum Jäten von Unkraut diente, und eine Dreschmaschine von Andrew Meikle um 1760, die die Spreu vom Weizen trennte.

Im Bereich **Viehzucht** führte Robert Bakewell bahnbrechende Neuerungen ein. Zur Graslandbewirtschaftung arbeitete er nahe am Fluss mit Umleitungen von Wasserwegen und Kanälen zur Bewässerung der Böden. Dadurch konnte er sicherstellen, dass auch in trockenen Perioden die Ernte nicht ausfiel und die Abhängigkeit von Regen generell gemindert oder gar beseitigt werden konnte. Er experimentierte mit unterschiedlichen Tierdüngern auf Versuchsfeldern und steigerte damit die Fruchtbarkeit der Böden. Und im Bereich der Tierzucht löste er sich von einer unkontrollierten Vermehrung des Viehs auf freier Weide. Er brachte gezielt gesunde und starke Schafe und Rinder zusammen und konnte durch ein evolutionäres Zuchtverhalten, von Generation zu Generation leistungstärkere Tiere aufziehen beziehungsweise Tiere mit erhöhtem Fleischanteil heranzüchten.

Für die Agrarrevolution des 17. Jahrhunderts und die darauffolgende industrielle Revolution im späten 18. und im 19. Jahrhundert war Großbritannien wegweisender Vorreiter und galt als Vorbild für Westeuropa, die USA und im späten 19. Jahrhundert ebenso für Japan. Eine rasch anwachsende Bevölkerung, ein dadurch hohes Angebot an Arbeitskräften, die Involvierung des Landes im Welthandel, aber vor allem die Rohstoffvorkommen waren wichtige Voraussetzungen, die alle zeitgleich eintrafen und somit einen technologischen Wandel sowohl erforderlich machten und gleichzeitig zuließen.

Der energetisch treibende Rohstoff der Industrialisierung war die Kohle, nicht nur weil sie eine bis zu vierfach höhere Energiedichte als Holz besitzt, sondern zudem deutlich langsamer brennt und somit ihre Energie moderater freisetzt. Großbritannien verfügte über große Kohlevorkommen. Anders als in vielen anderen Ländern lag ihre Kohle nicht tief, sodass sie auch ohne die Technologien für einen tiefen Bergbau erreichbar war. Dies und die Alternativlosigkeit gegenüber der Kohle, da das Land geringfügig bewaldete Flächen besaß, um Holz für Industrien mit hohem Energiebedarf versorgen zu können, katapultierte Großbritannien nach vorne und ermöglichte einen großen Entwicklungsvorsprung gegenüber anderen Ländern.

Aus bereits früher entwickelten Formen einer Dampfmaschine stellte erst Ende des 18. Jahrhunderts der schottische Ingenieur James Watt eine effiziente Version vor, die in den folgenden Jahrzehnten als eine gerngesehene und beliebte Maschine ihren Einsatz im Bergbau, in der Metall- und Textilindustrie finden sollte. Diese Technologie erlaubte nun auch anderen Regionen wie dem nordfranzösisch-wallonischen Raum, dem deutschen Ruhr- und Saargebiet sowie Schlesien und der Ukraine, deren Kohlevorräte in viel tieferen Erdschichten lagen, den maschinellen Tiefbergbau anzugehen.

Die günstige geografische Positionierung Großbritanniens und der Vorsprung in der Agrarwirtschaft als auch in der industriellen Wirtschaft befähigten das Land, den nationalen und internationalen Handel schneller aufzubauen. Hierdurch wurde ein großes Vermögen in Form von Kapital aufgebaut, sodass sich durch lukrative Investitionen neue Geschäftsfelder auftaten. Der Begriff der Monetarisierbarkeit durch Kapitalanlagen wurde frühzei-

tig verstanden. Investitionen liefen in die Finanzierung von Industriebetrieben, was dazu führte, dass sich ein gut funktionierendes Bankwesen entwickelte. So kam es, dass im späten 18. Jahrhundert speziell im englischen Raum Banken gegründet wurden und das Kredit-, Wechsel- und Anleihegeschäft zunehmend zu einem neuen Geschäftsfeld für Händler avancierte, während zentraleuropäische Länder erst ein halbes Jahrhundert später mit der Gründung von Aktienbanken nachzogen. Somit hat es durchaus traditionelle Gründe, dass England im Finanz- und Bankensektor heute noch international eine dominante Rolle einnimmt.

Die kohlebefeuerte Eisenbahn stellt bis heute den Inbegriff des Industrialisierungsmotors dar, der in Großbritannien in der ersten Hälfte des 19. Jahrhunderts entwickelt wurde. Durch die genannten technologischen Limitierungen im Bergbau und dadurch auch in der Stahlerzeugung für den Schienenverkehr waren die Vereinigten Staaten von Amerika und das Deutsche Reich mit einer Verzögerung von 30 bis 40 Jahren in der Lage, die industrielle Vormachtstellung Großbritanniens anzugreifen. Inzwischen hatte sich England im internationalen Kapitalverkehr zum unumstrittenen Zentrum der Welt entwickelt.

Bis zu diesem Zeitpunkt war Großbritannien keinerlei Konkurrenz ausgesetzt und bestimmte alleinig den Marktpreis über Rohstoffimporte und Produktexporte. Erst mit der Wettbewerbsfähigkeit anderer Länder, die über die vergangenen Jahrzehnte den Anschluss zum Markt aufgeholt hatten, setzte eine Preisregulierung über Angebot und Nachfrage ein.

Die Schlüsselsektoren in der deutschen industriellen Entwicklung lagen im Kohlebergbau, in der Eisenherstellung und im Maschinenbau. Die Eisenbahn und der Ausbau des Schienennetzes ermöglichten die dominante Nachfrage und somit den Durchbruch der industriellen Strukturen. Die Streckenlänge lag um 1840 im Gebiet des späteren Deutschen Reiches unter 500 km, 10 Jahre später bereits 6000 und zur Reichsgründung 1871 19.000 km.

Die Vereinigten Staaten, insbesondere die Nordstaaten, profitierten während ihrer ersten Schritte zur Industrialisierung enorm von ihrer gemeinsamen Geschichte, ihrer gemeinsamen Sprache und der vorherrschenden Herkunft vieler Einwanderer und Siedler aus dem großbritannischen Raum. Diverse Technologien wurden von britischen Siedlern auch während der Industrialisierung in die Staaten mitgebracht und übermittelt. Aufgrund des großflächigen Landes wurde früh erkannt, dass eine Ausweitung des Eisenbahnnetzes maßgeblich sein würde, um den Prozess der Industrialisierung rasch voranzutreiben. Um 1840 setzte in den Nordstaaten die Netzausweitung drastisch ein und wurde zeitgleich mit Deutschland vorangetrieben.

Die Südstaaten hingegen nahmen bis 1880 kaum an der Industrialisierung teil. Hier hatten sich viele Regionen auf den landwirtschaftlichen Anbau von Baumwolle konzentriert. Eine Weiterverarbeitung war nicht vorgesehen. Der Verkauf von Rohprodukten spielte die hauptsächliche Rolle im Handel, sodass lange Zeit industrielle Maschinen für weiterverarbeitende Verfahrensschritte nicht notwendig waren. Die Sklaverei bot den Großgrundbesitzern mit geringen Kosten ihre Felder zu bestellen, sodass der Bedarf einer Effizienzsteigerung und Kostenoptimierung durch Mechanisierung lange nicht erforderlich war.

Die Industrialisierung brachte eine fundamentale Veränderung, ja, eine Kehrtwende der gesellschaftlichen Ordnungen mit sich. Auf der einen Seite begünstigte sie weitreichende