

# Inhaltsverzeichnis

|             |                                            |           |
|-------------|--------------------------------------------|-----------|
| <b>1</b>    | <b>EINFÜHRUNG .....</b>                    | <b>13</b> |
| <b>1.1</b>  | <b>Interdisziplinäre Wissenschaft.....</b> | <b>13</b> |
| <b>1.2</b>  | <b>Definition des Roboters .....</b>       | <b>14</b> |
| <br>        |                                            |           |
| <b>2</b>    | <b>GESCHICHTE DER ROBOTER.....</b>         | <b>16</b> |
| <b>2.1</b>  | <b>Erste Ansätze .....</b>                 | <b>16</b> |
| <b>2.2</b>  | <b>Jahrhunderte danach .....</b>           | <b>17</b> |
| <b>2.3</b>  | <b>Die Bezeichnung „Roboter“ .....</b>     | <b>17</b> |
| <b>2.4</b>  | <b>Modernere Konzepte .....</b>            | <b>18</b> |
| <b>2.5</b>  | <b>Im 20. Jahrhundert .....</b>            | <b>18</b> |
| 2.5.1       | Von 1961 bis 1970.....                     | 19        |
| 2.5.2       | Von 1971 bis 1980.....                     | 19        |
| 2.5.3       | Von 1981 bis 1990.....                     | 20        |
| 2.5.4       | Von 1991 bis 2000.....                     | 21        |
| <b>2.6</b>  | <b>Ab 2001 .....</b>                       | <b>22</b> |
| <br>        |                                            |           |
| <b>3</b>    | <b>ROBOTERARTEN.....</b>                   | <b>24</b> |
| <b>3.1</b>  | <b>Stationäre Roboter .....</b>            | <b>25</b> |
| <b>3.2</b>  | <b>Mobile Roboter.....</b>                 | <b>25</b> |
| <b>3.3</b>  | <b>Arbeitsroboter.....</b>                 | <b>28</b> |
| <b>3.4</b>  | <b>Serviceroboter .....</b>                | <b>29</b> |
| <b>3.5</b>  | <b>Personal Roboter.....</b>               | <b>31</b> |
| <b>3.6</b>  | <b>Erkundungsroboter .....</b>             | <b>31</b> |
| <b>3.7</b>  | <b>Humanoide Roboter .....</b>             | <b>33</b> |
| <b>3.8</b>  | <b>Androiden.....</b>                      | <b>34</b> |
| <b>3.9</b>  | <b>Industrieroboter.....</b>               | <b>34</b> |
| <b>3.10</b> | <b>Militär- und Kampfroboer .....</b>      | <b>35</b> |
| <b>3.11</b> | <b>Rettungsroboter.....</b>                | <b>37</b> |
| <b>3.12</b> | <b>Roboter in der Medizin.....</b>         | <b>38</b> |
| <b>3.13</b> | <b>Spielzeugroboter .....</b>              | <b>41</b> |
| <b>3.14</b> | <b>Schwarmroboter .....</b>                | <b>42</b> |
| <b>3.15</b> | <b>BEAM .....</b>                          | <b>44</b> |
| <b>3.16</b> | <b>Nanoroboter .....</b>                   | <b>44</b> |
| <b>3.17</b> | <b>Bionische Roboter.....</b>              | <b>47</b> |
| <b>3.18</b> | <b>Bots.....</b>                           | <b>48</b> |
| <b>3.19</b> | <b>Autonome Kraftfahrzeuge .....</b>       | <b>48</b> |
| <br>        |                                            |           |
| <b>4</b>    | <b>AUTONOMIE BEI MOBILEN ROBOTERN.....</b> | <b>50</b> |
| <b>4.1</b>  | <b>Grade der Autonomie.....</b>            | <b>50</b> |
| <b>4.2</b>  | <b>Fähigkeiten und Forderungen.....</b>    | <b>51</b> |

|            |                                                        |           |
|------------|--------------------------------------------------------|-----------|
| <b>4.3</b> | <b>Weltmodelle .....</b>                               | <b>51</b> |
| <b>4.4</b> | <b>Sensoren .....</b>                                  | <b>52</b> |
| <b>4.5</b> | <b>Navigation .....</b>                                | <b>53</b> |
| <b>4.6</b> | <b>Steuerungsarchitekturen autonomer Roboter .....</b> | <b>54</b> |
| <b>4.7</b> | <b>Energieversorgung mobiler Roboter.....</b>          | <b>56</b> |
| 4.7.1      | Akkumulatoren.....                                     | 57        |
| 4.7.2      | „Supercaps“ .....                                      | 58        |
| 4.7.3      | Brennstoffzellen .....                                 | 59        |
| 4.7.4      | Photovoltaik .....                                     | 59        |
| 4.7.5      | Strom von Mikroben .....                               | 60        |
| <b>5</b>   | <b>DIE ROBOTERGESETZE .....</b>                        | <b>62</b> |
| <b>5.1</b> | <b>Nulltes Gesetz.....</b>                             | <b>62</b> |
| <b>5.2</b> | <b>Zukünftige Herausforderungen.....</b>               | <b>63</b> |
| <b>6</b>   | <b>MECHANISCHE KOMPONENTEN EINES ROBOTERS .....</b>    | <b>64</b> |
| <b>6.1</b> | <b>Mechanischer Aufbau .....</b>                       | <b>64</b> |
| <b>6.2</b> | <b>Roboterkinematik .....</b>                          | <b>65</b> |
| <b>6.3</b> | <b>Freiheitsgrade.....</b>                             | <b>66</b> |
| <b>6.4</b> | <b>Gelenke und Achsen.....</b>                         | <b>67</b> |
| 6.4.1      | Rotations- und Translationsachsen .....                | 67        |
| 6.4.2      | Gelenkbauformen .....                                  | 68        |
| 6.4.3      | Symbole für Roboterachsen .....                        | 69        |
| <b>6.5</b> | <b>Rotatorische Achsen.....</b>                        | <b>70</b> |
| 6.5.1      | Kompaktgelenke.....                                    | 70        |
| 6.5.2      | Konstruktive Maßnahmen.....                            | 71        |
| 6.5.3      | Getriebearten .....                                    | 72        |
| 6.5.4      | Harmonic Drive Getriebe .....                          | 75        |
| <b>6.6</b> | <b>Translatorische Achsen – Linearantriebe.....</b>    | <b>77</b> |
| 6.6.1      | Antriebskonzepte und Eigenschaften .....               | 78        |
| 6.6.2      | Zahnstangen-Stirnrad-Antrieb.....                      | 78        |
| 6.6.3      | Spindelantriebe .....                                  | 79        |
| 6.6.4      | Zahnriementrieb.....                                   | 80        |
| 6.6.5      | Elektrozylinder .....                                  | 81        |
| 6.6.6      | Hydraulik und Pneumatik.....                           | 82        |
| 6.6.7      | Linearmotoren.....                                     | 82        |
| <b>6.7</b> | <b>Die kinematische Kette .....</b>                    | <b>84</b> |
| 6.7.1      | Serielle Kinematik.....                                | 84        |
| 6.7.2      | Parallelkinematik.....                                 | 85        |
| 6.7.3      | Hexapoden, Tripoden.....                               | 86        |
| <b>6.8</b> | <b>DH-Transformation.....</b>                          | <b>86</b> |
| <b>6.9</b> | <b>Menschliche Gelenke .....</b>                       | <b>88</b> |
| 6.9.1      | Experiment .....                                       | 89        |
| 6.9.2      | Rotationsbewegungen .....                              | 90        |

|            |                                                            |            |
|------------|------------------------------------------------------------|------------|
| <b>7</b>   | <b>LAGEREGELUNG UND WEGMESSUNG.....</b>                    | <b>91</b>  |
| <b>7.1</b> | <b>Lageregelkreise .....</b>                               | <b>91</b>  |
| <b>7.2</b> | <b>Wegmessung .....</b>                                    | <b>92</b>  |
| 7.2.1      | Direkt und indirekt .....                                  | 92         |
| 7.2.2      | Absolut oder inkremental .....                             | 93         |
| 7.2.3      | Gray-Code .....                                            | 95         |
| <b>7.3</b> | <b>Drehzahlmessung.....</b>                                | <b>97</b>  |
| <br>       |                                                            |            |
| <b>8</b>   | <b>KOORDINATENSYSTEME .....</b>                            | <b>98</b>  |
| <b>8.1</b> | <b>Koordinaten.....</b>                                    | <b>98</b>  |
| 8.1.1      | Kartesische Koordinaten .....                              | 99         |
| 8.1.2      | Polarkoordinaten .....                                     | 100        |
| 8.1.3      | Zylinderkoordinaten.....                                   | 101        |
| 8.1.4      | Kugelkoordinaten.....                                      | 102        |
| <b>8.2</b> | <b>Bezugssysteme am Roboter .....</b>                      | <b>103</b> |
| 8.2.1      | Raumbezug .....                                            | 103        |
| 8.2.2      | Achsenbezug .....                                          | 105        |
| 8.2.3      | Transformationen .....                                     | 106        |
| <br>       |                                                            |            |
| <b>9</b>   | <b>INDUSTRIEROBOTER.....</b>                               | <b>107</b> |
| <b>9.1</b> | <b>Erste Industrieroboter .....</b>                        | <b>107</b> |
| <b>9.2</b> | <b>Definitionen, Kenngrößen und Anwendungen .....</b>      | <b>108</b> |
| 9.2.1      | Definitionen .....                                         | 108        |
| 9.2.2      | Kenngrößen von Industrierobotern .....                     | 109        |
| 9.2.3      | Anwendungsgebiete .....                                    | 112        |
| <b>9.3</b> | <b>Aufbau von Industrierobotern.....</b>                   | <b>113</b> |
| 9.3.1      | Bestandteile .....                                         | 113        |
| 9.3.2      | Mechanischer Aufbau .....                                  | 114        |
| 9.3.3      | Bauarten.....                                              | 115        |
| <b>9.4</b> | <b>Knickarm-Roboter .....</b>                              | <b>116</b> |
| <b>9.5</b> | <b>Schwenkarm-Roboter .....</b>                            | <b>118</b> |
| <b>9.6</b> | <b>Spezielle Bauformen .....</b>                           | <b>119</b> |
| 9.6.1      | SCARA-Roboter .....                                        | 119        |
| 9.6.2      | Delta-Roboter .....                                        | 121        |
| 9.6.3      | Leichtbauroboter .....                                     | 124        |
| 9.6.4      | Soft Robotics .....                                        | 127        |
| 9.6.5      | Portalroboter .....                                        | 128        |
| <b>9.7</b> | <b>Aufgaben und Komponenten der Robotersteuerung .....</b> | <b>130</b> |
| 9.7.1      | Aufgaben und Anforderungen .....                           | 130        |
| 9.7.2      | Komponenten der Steuerung .....                            | 131        |
| 9.7.3      | Programmiergeräte.....                                     | 133        |
| 9.7.4      | Bewegungsarten .....                                       | 135        |
| 9.7.5      | Betriebsarten .....                                        | 137        |
| <b>9.8</b> | <b>Markt und Hersteller .....</b>                          | <b>138</b> |

|             |                                                              |            |
|-------------|--------------------------------------------------------------|------------|
| <b>10</b>   | <b>EFFEKTOREN UND GREIFER.....</b>                           | <b>144</b> |
| <b>10.1</b> | <b>Definitionen.....</b>                                     | <b>144</b> |
| <b>10.2</b> | <b>Roboter-Handachsen .....</b>                              | <b>146</b> |
| 10.2.1      | Antriebe.....                                                | 146        |
| 10.2.2      | Kinematikstrukturen .....                                    | 147        |
| <b>10.3</b> | <b>Greifer.....</b>                                          | <b>148</b> |
| <b>10.4</b> | <b>Greiferprinzipien.....</b>                                | <b>150</b> |
| <b>10.5</b> | <b>Anthropomorphe Greifer .....</b>                          | <b>158</b> |
| 10.5.1      | Roboterhände .....                                           | 158        |
| 10.5.2      | Antriebe.....                                                | 159        |
| 10.5.3      | Die DLR-Hand .....                                           | 160        |
| <b>10.6</b> | <b>Roboterwerkzeuge .....</b>                                | <b>161</b> |
| <br>        |                                                              |            |
| <b>11</b>   | <b>SICHERHEIT UND SCHUTZEINRICHTUNGEN IN DER ROBOTIK ...</b> | <b>165</b> |
| <b>11.1</b> | <b>Sicherheitstechnik allgemein.....</b>                     | <b>165</b> |
| <b>11.2</b> | <b>Risikobeurteilung .....</b>                               | <b>166</b> |
| 11.2.1      | Fehlverhalten .....                                          | 167        |
| 11.2.2      | Gefährdungen .....                                           | 167        |
| 11.2.3      | Risikobewertung.....                                         | 168        |
| 11.2.4      | Risikominderung.....                                         | 168        |
| <b>11.3</b> | <b>Die Richtlinie EN ISO 13849-1 .....</b>                   | <b>169</b> |
| 11.3.1      | Performance-Level .....                                      | 170        |
| 11.3.2      | Einstufung des Risikos .....                                 | 170        |
| 11.3.3      | Risikograf.....                                              | 171        |
| 11.3.4      | Ermittlung des Performance Levels.....                       | 171        |
| <b>11.4</b> | <b>Von Robotern ausgehende Gefahren.....</b>                 | <b>172</b> |
| <b>11.5</b> | <b>Schutzmaßnahmen.....</b>                                  | <b>173</b> |
| 11.5.1      | Sicherheitsfunktionen .....                                  | 174        |
| 11.5.2      | Schutzeinrichtungen.....                                     | 174        |
| 11.5.3      | Berührungslos wirkender Schutz.....                          | 176        |
| <b>11.6</b> | <b>Sicheres Stillsetzen.....</b>                             | <b>177</b> |
| <b>11.7</b> | <b>Redundanz .....</b>                                       | <b>180</b> |
| <b>11.8</b> | <b>Mensch-Roboter-Kollaboration.....</b>                     | <b>181</b> |
| 11.8.1      | DIN EN ISO 10218-1/2 .....                                   | 181        |
| 11.8.2      | Kollaborierende Roboter.....                                 | 182        |
| 11.8.3      | Roboter ohne Schutzzaun .....                                | 182        |
| 11.8.4      | Kollisionsüberwachung .....                                  | 184        |
| <br>        |                                                              |            |
| <b>12</b>   | <b>PROGRAMMIERUNG VON ROBOTERN .....</b>                     | <b>186</b> |
| <b>12.1</b> | <b>Online-Programmierung .....</b>                           | <b>187</b> |
| 12.1.1      | Teach-in-Programmierung .....                                | 187        |
| <b>12.2</b> | <b>Offline-Programmierung.....</b>                           | <b>191</b> |
| 12.2.1      | Textuelle Programmierung.....                                | 191        |
| 12.2.2      | CAD-gestützte Verfahren .....                                | 192        |
| 12.2.3      | Simulation .....                                             | 194        |
| 12.2.4      | Explizite Programmierverfahren .....                         | 194        |

|             |                                                   |            |
|-------------|---------------------------------------------------|------------|
| 12.2.5      | Implizite Programmierverfahren.....               | 195        |
| 12.2.6      | Weitere Verfahren .....                           | 196        |
| <b>12.3</b> | <b>Programmiersprachen für Roboter.....</b>       | <b>196</b> |
| 12.3.1      | Grundelemente von Robotersprachen .....           | 197        |
| 12.3.2      | Einige Programmiersprachen.....                   | 200        |
| 12.3.3      | Kurzbeschreibung einiger Programmiersprachen..... | 201        |
| 12.3.4      | KRL von Kuka .....                                | 203        |
| <b>12.4</b> | <b>Das Problem der Normierung.....</b>            | <b>206</b> |
| 12.4.1      | Programmiersprache IRL.....                       | 207        |
| 12.4.2      | IRDATA-Code.....                                  | 207        |
| <b>12.5</b> | <b>Einbindung einer SPS .....</b>                 | <b>208</b> |
| <b>12.6</b> | <b>Tendenz: Einfachere Programmierung .....</b>   | <b>209</b> |
| <br>        |                                                   |            |
| <b>13</b>   | <b>DIE FIRMA KUKA .....</b>                       | <b>211</b> |
| <b>13.1</b> | <b>Unternehmensgeschichte.....</b>                | <b>211</b> |
| <b>13.2</b> | <b>Kuka Roboter und Systems.....</b>              | <b>212</b> |
| <b>13.3</b> | <b>Industrie 4.0.....</b>                         | <b>213</b> |
| <b>13.4</b> | <b>Mobiler Produktionsassistent .....</b>         | <b>215</b> |
| <br>        |                                                   |            |
| <b>14</b>   | <b>SENSOREN FÜR ROBOTER .....</b>                 | <b>216</b> |
| <b>14.1</b> | <b>Grundlagen der Sensorik.....</b>               | <b>216</b> |
| 14.1.1      | Sensoren in der Automatisierung .....             | 217        |
| 14.1.2      | Technische Sensoren.....                          | 218        |
| <b>14.2</b> | <b>Sensoren der Robotik .....</b>                 | <b>219</b> |
| 14.2.1      | Aufgaben der Sensoren, Anforderungen .....        | 219        |
| 14.2.2      | Interne Sensoren.....                             | 220        |
| 14.2.3      | Externe Sensoren .....                            | 221        |
| <b>14.3</b> | <b>Näherungsschalter .....</b>                    | <b>222</b> |
| 14.3.1      | Berührende Sensoren .....                         | 222        |
| 14.3.2      | Berührungslos wirkende Geber .....                | 223        |
| <b>14.4</b> | <b>Funktion diverser Näherungsschalter .....</b>  | <b>224</b> |
| 14.4.1      | Induktive Näherungsschalter .....                 | 224        |
| 14.4.2      | Kapazitive Näherungsschalter.....                 | 225        |
| 14.4.3      | Magnetische Näherungsschalter .....               | 226        |
| <b>14.5</b> | <b>Photoelektrische Sensoren .....</b>            | <b>229</b> |
| 14.5.1      | Photoelektrischer Effekt .....                    | 230        |
| 14.5.2      | Optische Näherungsschalter .....                  | 230        |
| 14.5.3      | Lichtschraken .....                               | 230        |
| <b>14.6</b> | <b>Bildverarbeitung .....</b>                     | <b>232</b> |
| <b>14.7</b> | <b>Sensoren für mobile Roboter.....</b>           | <b>236</b> |
| 14.7.1      | Interne und externe Sensoren .....                | 236        |
| 14.7.2      | Näherungssensoren .....                           | 237        |
| 14.7.3      | Taktile Sensoren.....                             | 238        |
| 14.7.4      | Ultraschallsensoren.....                          | 239        |
| 14.7.5      | Messung mit Infrarot .....                        | 241        |
| 14.7.6      | Laser .....                                       | 241        |

|             |                                                           |            |
|-------------|-----------------------------------------------------------|------------|
| 14.7.7      | Kamera .....                                              | 242        |
| 14.7.8      | „Dead-Reckoning“ .....                                    | 242        |
| <b>15</b>   | <b>HUMANOIDE ROBOTER.....</b>                             | <b>244</b> |
| <b>15.1</b> | <b>Der Traum vom künstlichen Menschen .....</b>           | <b>244</b> |
| <b>15.2</b> | <b>Wesentliche Eigenschaften humanoider Roboter .....</b> | <b>246</b> |
| <b>15.3</b> | <b>Technische Realisierung .....</b>                      | <b>247</b> |
| 15.3.1      | Technische Herausforderungen .....                        | 247        |
| 15.3.2      | Sensoren.....                                             | 248        |
| 15.3.3      | Nur menschliche Sinnesorgane? .....                       | 250        |
| <b>15.4</b> | <b>Aufbau .....</b>                                       | <b>250</b> |
| <b>15.5</b> | <b>Die Roboterhand.....</b>                               | <b>252</b> |
| 15.5.1      | Die menschliche Hand.....                                 | 252        |
| 15.5.2      | Roboterhände .....                                        | 253        |
| 15.5.3      | Antriebe.....                                             | 254        |
| 15.5.4      | Steuerung .....                                           | 256        |
| 15.5.5      | Mensch-Roboter-Kooperation .....                          | 258        |
| <b>15.6</b> | <b>Der aufrechte Gang .....</b>                           | <b>259</b> |
| 15.6.1      | Analyse des Gehens.....                                   | 260        |
| 15.6.2      | Neue Lösungsansätze .....                                 | 262        |
| <b>15.7</b> | <b>Autonomie humanoider Roboter .....</b>                 | <b>265</b> |
| 15.7.1      | Autonome Roboter .....                                    | 265        |
| 15.7.2      | Realisierung.....                                         | 266        |
| <b>15.8</b> | <b>Bekannte humanoide Roboter .....</b>                   | <b>269</b> |
| <b>15.9</b> | <b>Roboterethik .....</b>                                 | <b>272</b> |
| <b>16</b>   | <b>KÜNSTLICHE INTELLIGENZ.....</b>                        | <b>275</b> |
| <b>16.1</b> | <b>Was ist Intelligenz? .....</b>                         | <b>275</b> |
| <b>16.2</b> | <b>Künstliche Intelligenz.....</b>                        | <b>276</b> |
| <b>16.3</b> | <b>Maschinelles Sehen .....</b>                           | <b>277</b> |
| <b>16.4</b> | <b>Mustererkennung .....</b>                              | <b>279</b> |
| <b>16.5</b> | <b>Künstliche neuronale Netze .....</b>                   | <b>281</b> |
| <b>16.6</b> | <b>Kybernetik .....</b>                                   | <b>284</b> |
| <b>16.7</b> | <b>Pioniere der künstlichen Intelligenz.....</b>          | <b>286</b> |
| <b>17</b>   | <b>AUSBLICK: ZUKÜNFTIGE ENTWICKLUNGEN.....</b>            | <b>290</b> |
|             | <b>STICHWORTVERZEICHNIS.....</b>                          | <b>300</b> |