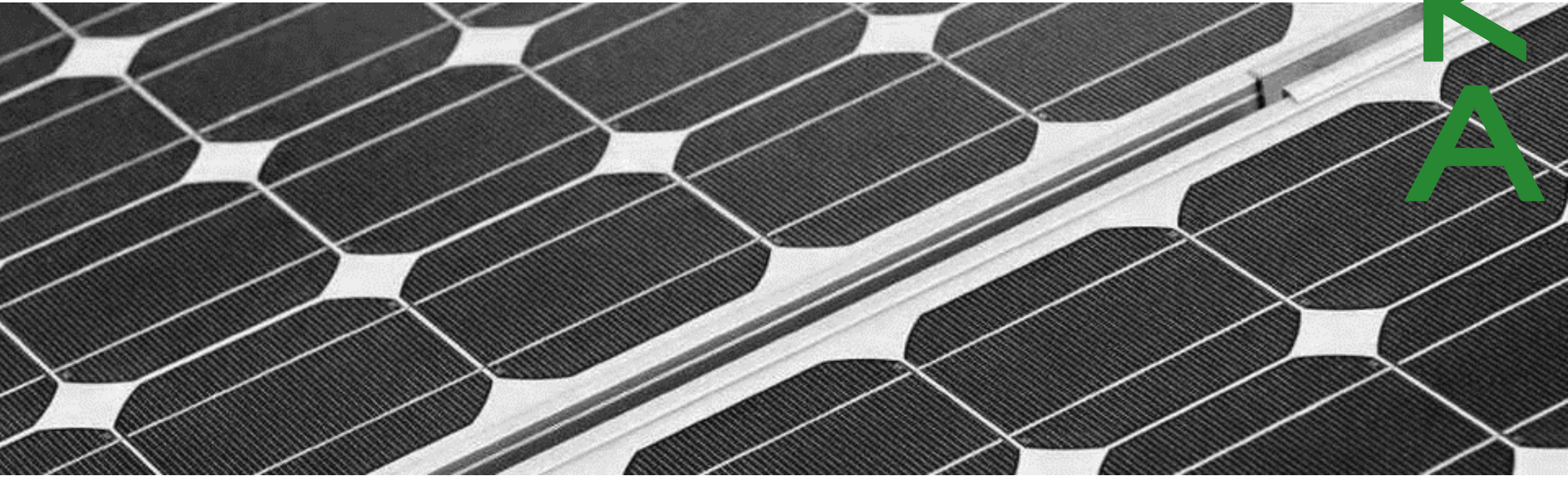




# Machine Learning zur automatischen Sichtprüfung im Qualitätsmanagement



# Qualität 4.0



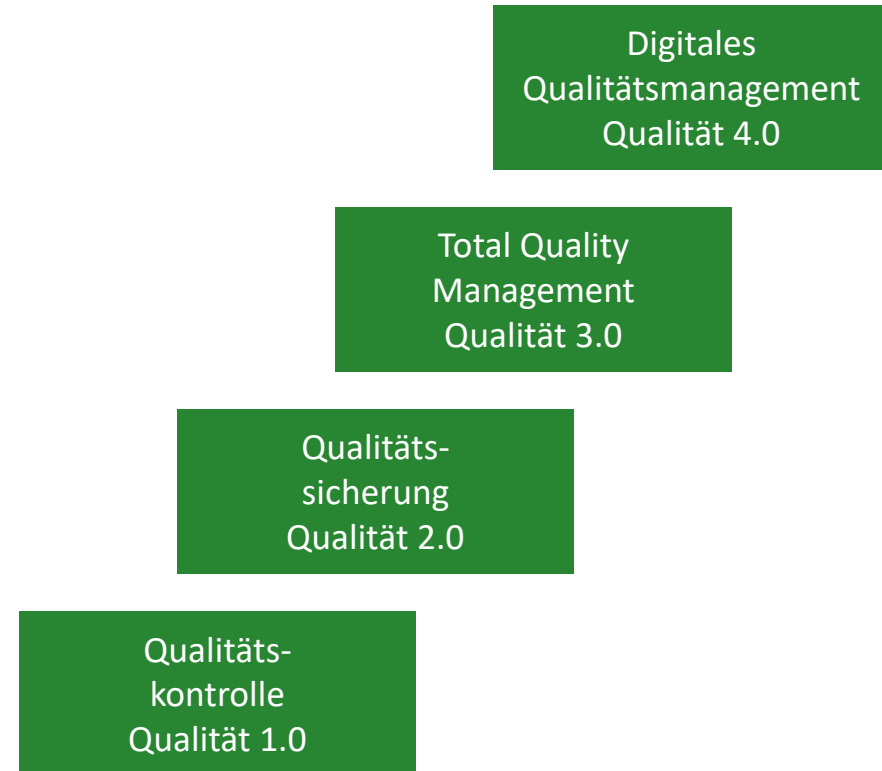
Systematische Digitalisierung in Unternehmen erlaubt die Einführung eines völlig neuen Qualitätsmanagements

In Anlehnung an den Begriff Industrie 4.0 wird dafür der Begriff Qualität 4.0 genutzt

- + Intelligente, sich selbst überwachende Fertigungslinien
- + Stetig verfügbare Aussagen über die aktuelle Fertigungsqualität
- + Kontinuierlich protokollierte Prozessparameter

American Society for Quality:

Quality 4.0 brings together Industry 4.0's advanced digital technologies with quality excellence to drive substantial performance and effectiveness improvements.



# Qualität 4.0 und Machine Learning

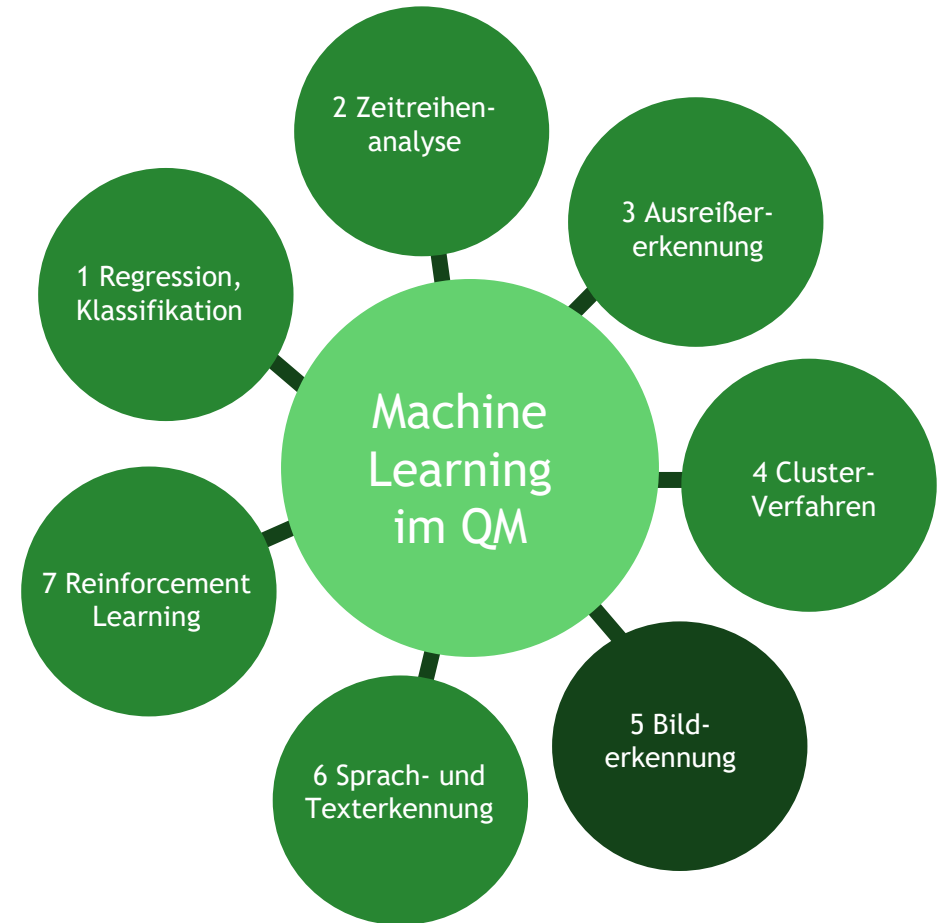


## Methoden von Qualität 4.0

- + Intelligente Vernetzung von Maschinen und Abläufen
- + Einsatz von Informationstechnologie zur effizienten Umsetzung
- + Methoden des Machine Learning, um aus Daten zu lernen und Modelle aufzubauen

## Machine Learning

- + Generierung von Wissen aus Vergangenheitsdaten
- + Muster und Gesetzmäßigkeiten werden mit Hilfe von Algorithmen erkannt und modelliert
- + Modelle werden auf neue Daten angewandt, um Prognosen zu erstellen



Grafik: successfactory management coaching gmbh

# Sichtprüfung



Wesentliches Element der statistischen Prozesskontrolle ist die stetige Bewertung der Fertigungsqualität

Sichtprüfungen zum Beispiel zur Entdeckung von

- + Mechanische Beschädigung und Schmutzablagerungen
- + Montagefehler und Gratbildung
- + Geometrische Abweichungen

Mangelnde Aussagesicherheit der manuelle Sichtprüfung

- + Monotone und ermüdende Arbeit
- + Konzentration der Mitarbeitenden
- + Anteil nicht entdeckter Fehler zwischen 5 % und 30 %

Automatisierung von Sichtprüfungen zur Steigerung der Aussagesicherheit und damit der Datenqualität



Foto: Ronald Bonß

# Sichtprüfung von Solarmodulen



Sichtprüfungen zur Qualitätskontrolle für Dünnschicht-Solarmodule

- + Inversen Betrieb der Solarzelle führt zur sogenannten Elektrolumineszenz
- + Helle Stellen im Bild weisen auf hohe Stromdichten hin
- + Dunkle Stellen weisen auf Unterbrechungen hin

Bild wird digital aufgenommen und abgespeichert

Mitarbeiter bewerten die Aufnahmen und ordnen die gefertigten Solarmodule in Klassen ein

Klassifizierter Datensatz repräsentiert das Wissen über diese Qualitätsbewertung

Datensatz ist Ausgangspunkt für eine Automatisierung mit Neuronalen Netzen

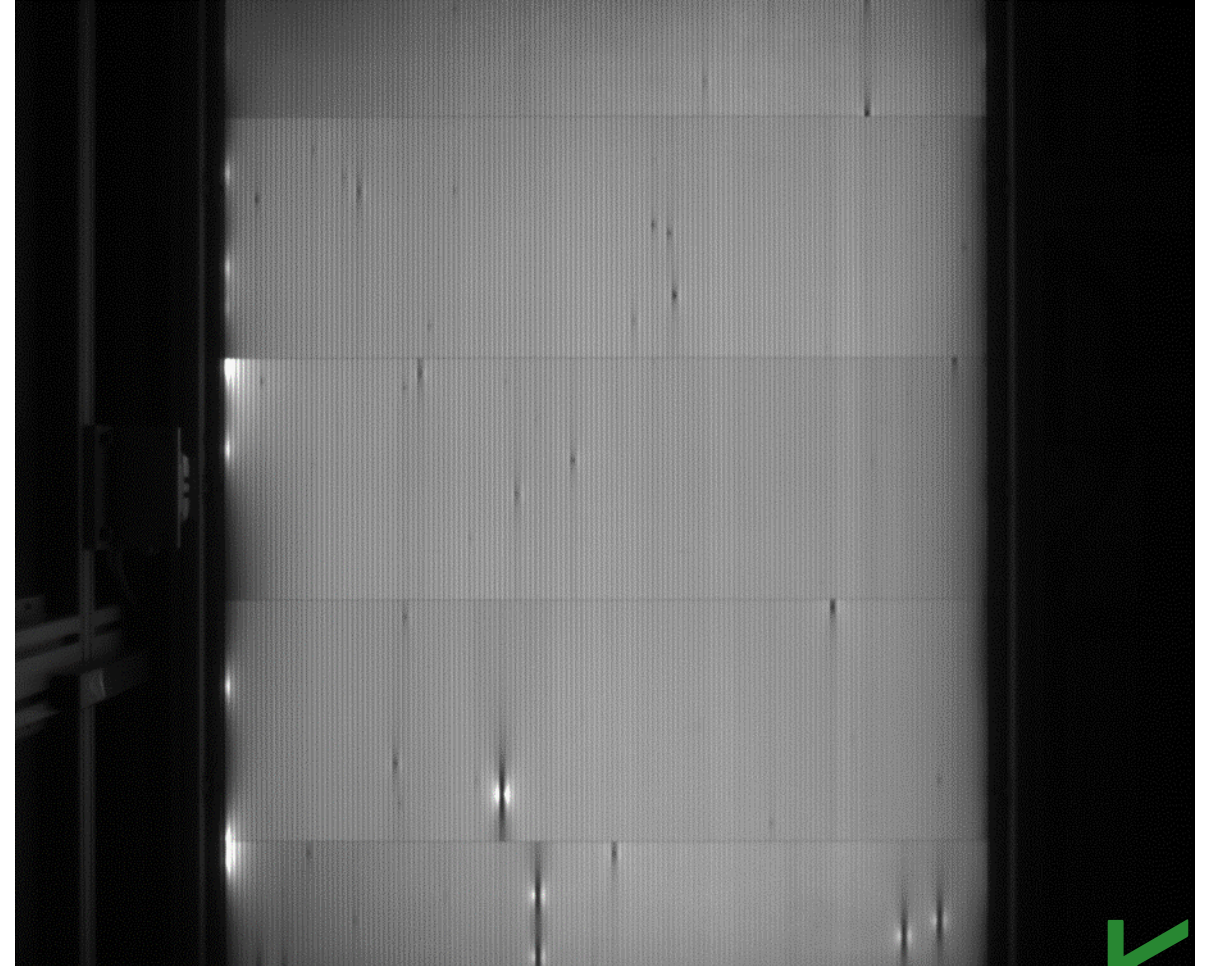


Foto: Solibro GmbH

# Sichtprüfung von Solarmodulen



Sichtprüfungen zur Qualitätskontrolle für Dünnschicht-Solarmodule

- + Inversen Betrieb der Solarzelle führt zur sogenannten Elektrolumineszenz
- + Helle Stellen im Bild weisen auf hohe Stromdichten hin
- + Dunkle Stellen weisen auf Unterbrechungen hin

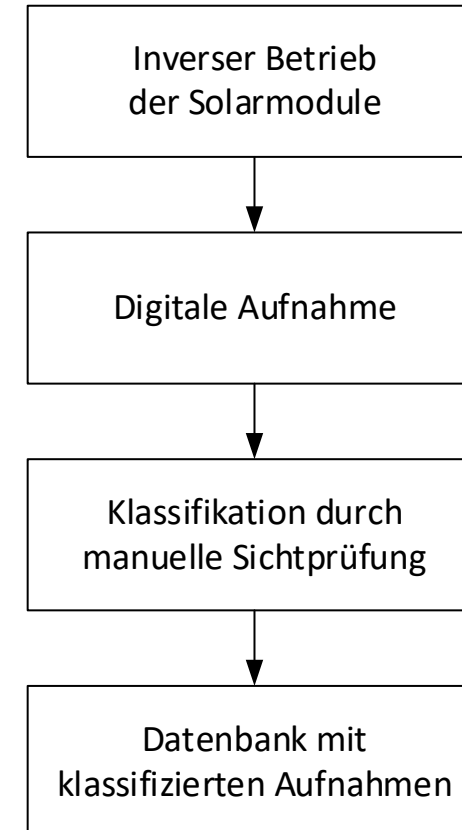
Bild wird digital aufgenommen und abgespeichert

Mitarbeiter bewerten die Aufnahmen und ordnen die gefertigten Solarmodule in Klassen ein

Klassifizierter Datensatz repräsentiert das Wissen über diese Qualitätsbewertung

Datensatz ist Ausgangspunkt für eine Automatisierung mit Neuronalen Netzen

Datenfluss Manuelle Sichtprüfung



# Automatische Sichtprüfung von Solarmodulen



Bilder von Modulen gleicher Kategorie unterscheiden sich teilweise erheblich

- + Helligkeit und Kontrast
- + Unterschiedliche kleinere Abweichungen
- + Unterschiedliche Fehlerbilder

Varianz in den Bildern erfordert den Einsatz von Algorithmen, die mit dieser Varianz umgehen können

In diesem Projekt werden Neuronale Netze zur automatischen Sichtprüfung eingesetzt

Zur sicheren und schnelleren Verarbeitung wird vorab eine Signalvorverarbeitung durchgeführt

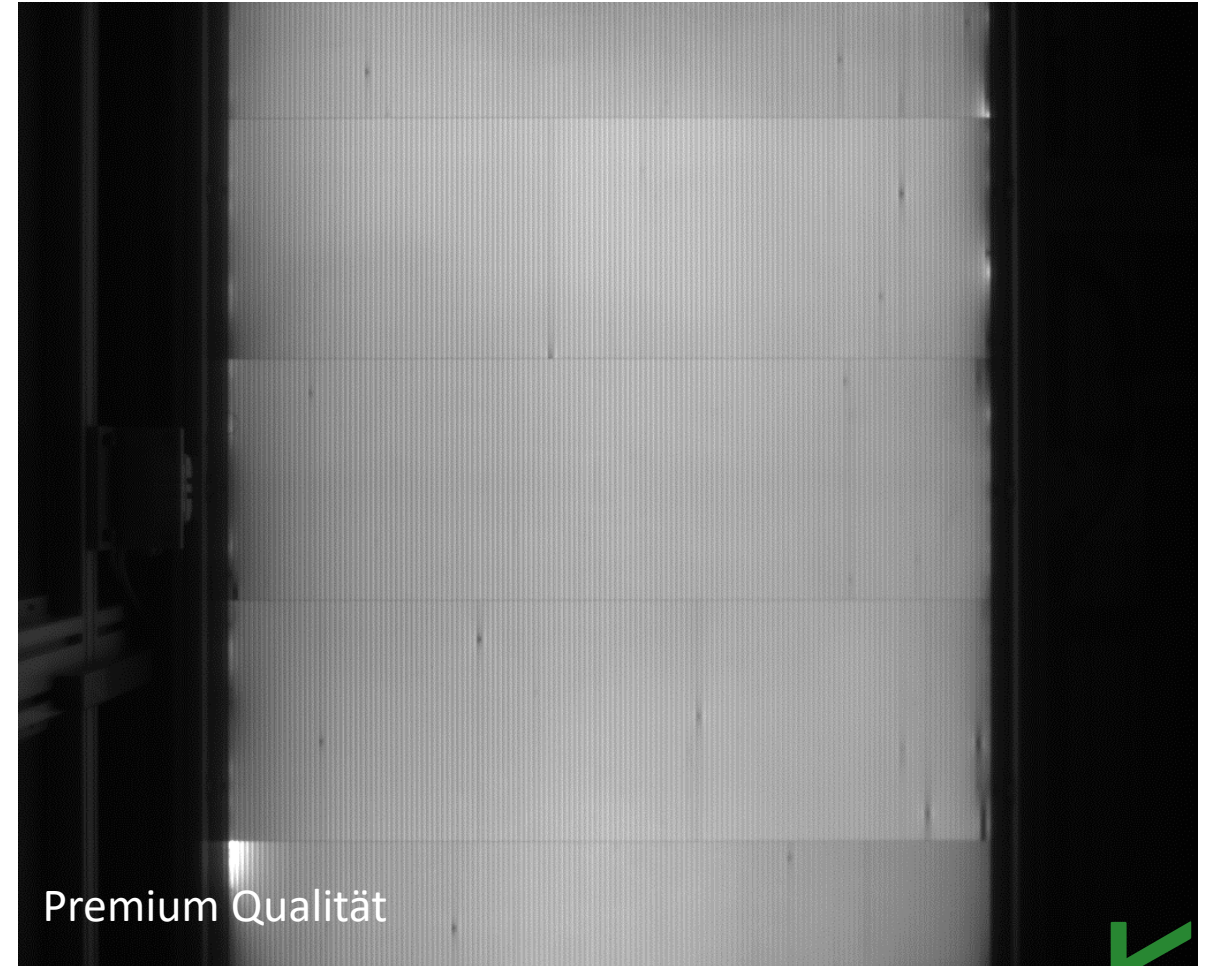


Foto: Solibro GmbH

# Automatische Sichtprüfung von Solarmodulen



Bilder von Modulen gleicher Kategorie unterscheiden sich teilweise erheblich

- + Helligkeit und Kontrast
- + Unterschiedliche kleinere Abweichungen
- + Unterschiedliche Fehlerbilder

Varianz in den Bildern erfordert den Einsatz von Algorithmen, die mit dieser Varianz umgehen können

In diesem Projekt werden Neuronale Netze zur automatischen Sichtprüfung eingesetzt

Zur sicheren und schnelleren Verarbeitung wird vorab eine Signalvorverarbeitung durchgeführt

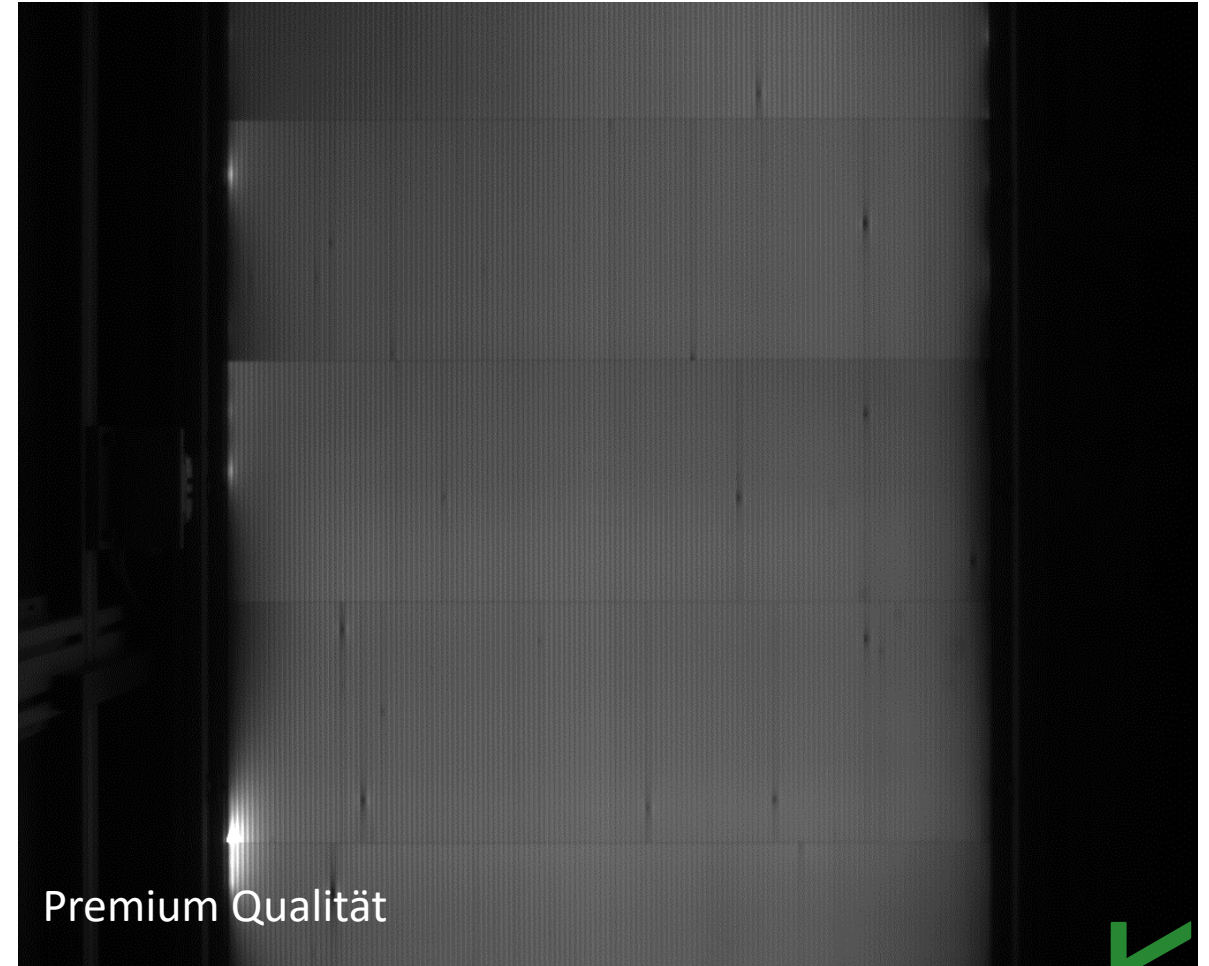


Foto: Solibro GmbH



# Automatische Sichtprüfung von Solarmodulen



Bilder von Modulen gleicher Kategorie unterscheiden sich teilweise erheblich

- + Helligkeit und Kontrast
- + Unterschiedliche kleinere Abweichungen
- + Unterschiedliche Fehlerbilder

Varianz in den Bildern erfordert den Einsatz von Algorithmen, die mit dieser Varianz umgehen können

In diesem Projekt werden Neuronale Netze zur automatischen Sichtprüfung eingesetzt

Zur sicheren und schnelleren Verarbeitung wird vorab eine Signalvorverarbeitung durchgeführt

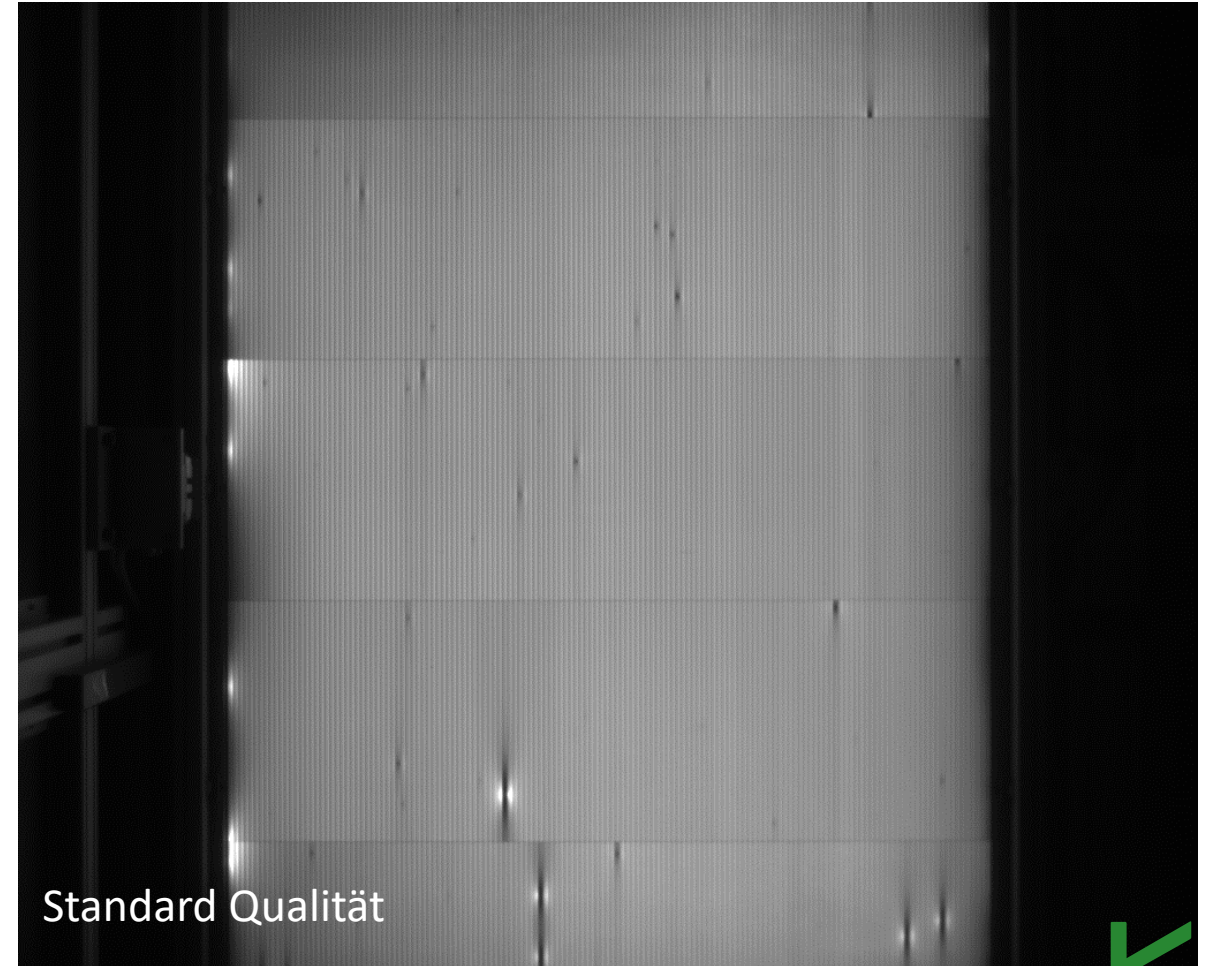


Foto: Solibro GmbH

# Automatische Sichtprüfung von Solarmodulen



Bilder von Modulen gleicher Kategorie unterscheiden sich teilweise erheblich

- + Helligkeit und Kontrast
- + Unterschiedliche kleinere Abweichungen
- + Unterschiedliche Fehlerbilder

Varianz in den Bildern erfordert den Einsatz von Algorithmen, die mit dieser Varianz umgehen können

In diesem Projekt werden Neuronale Netze zur automatischen Sichtprüfung eingesetzt

Zur sicheren und schnelleren Verarbeitung wird vorab eine Signalvorverarbeitung durchgeführt

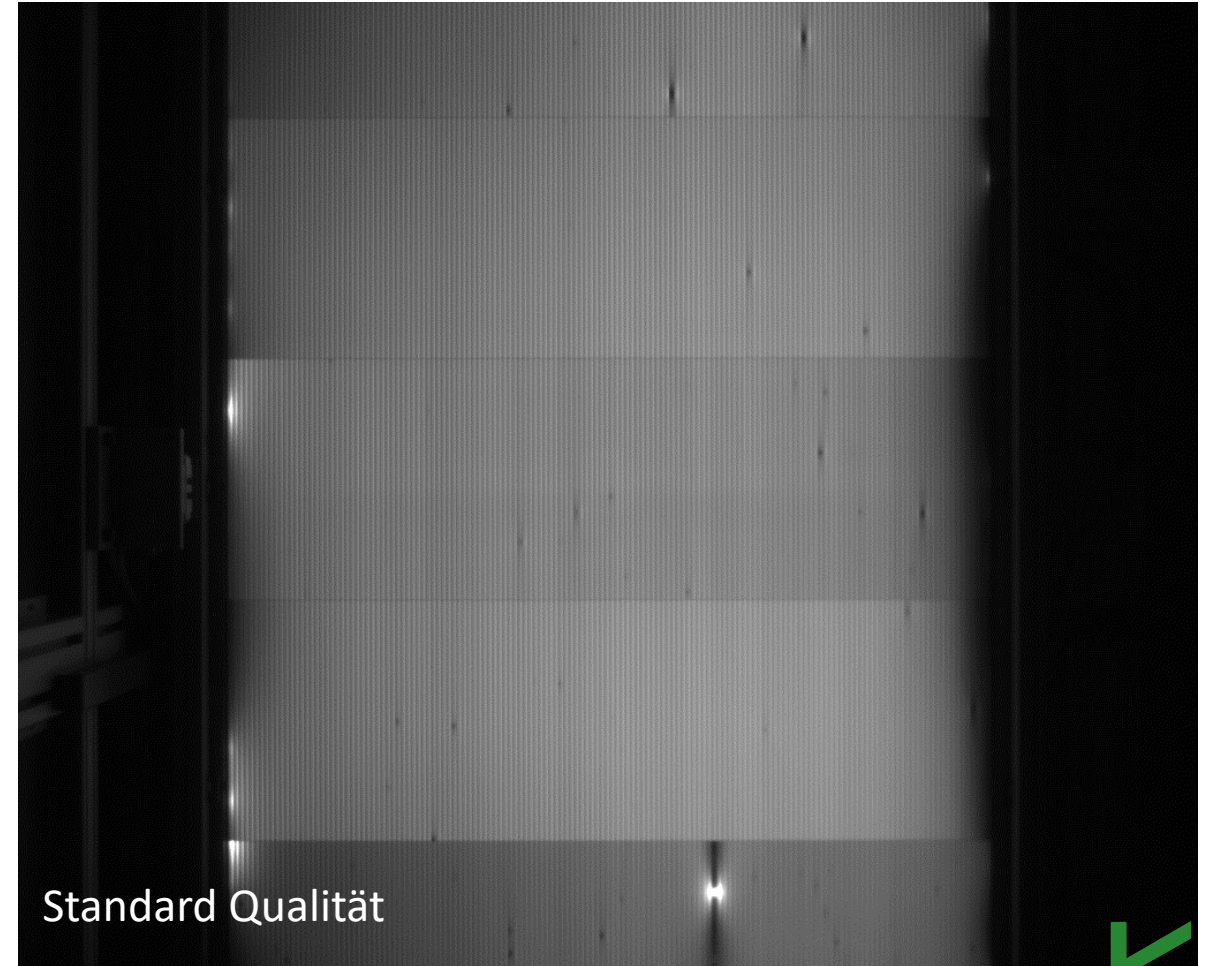


Foto: Solibro GmbH

# Automatische Sichtprüfung von Solarmodulen



Bilder von Modulen gleicher Kategorie unterscheiden sich teilweise erheblich

- + Helligkeit und Kontrast
- + Unterschiedliche kleinere Abweichungen
- + Unterschiedliche Fehlerbilder

Varianz in den Bildern erfordert den Einsatz von Algorithmen, die mit dieser Varianz umgehen können

In diesem Projekt werden Neuronale Netze zur automatischen Sichtprüfung eingesetzt

Zur sicheren und schnelleren Verarbeitung wird vorab eine Signalvorverarbeitung durchgeführt

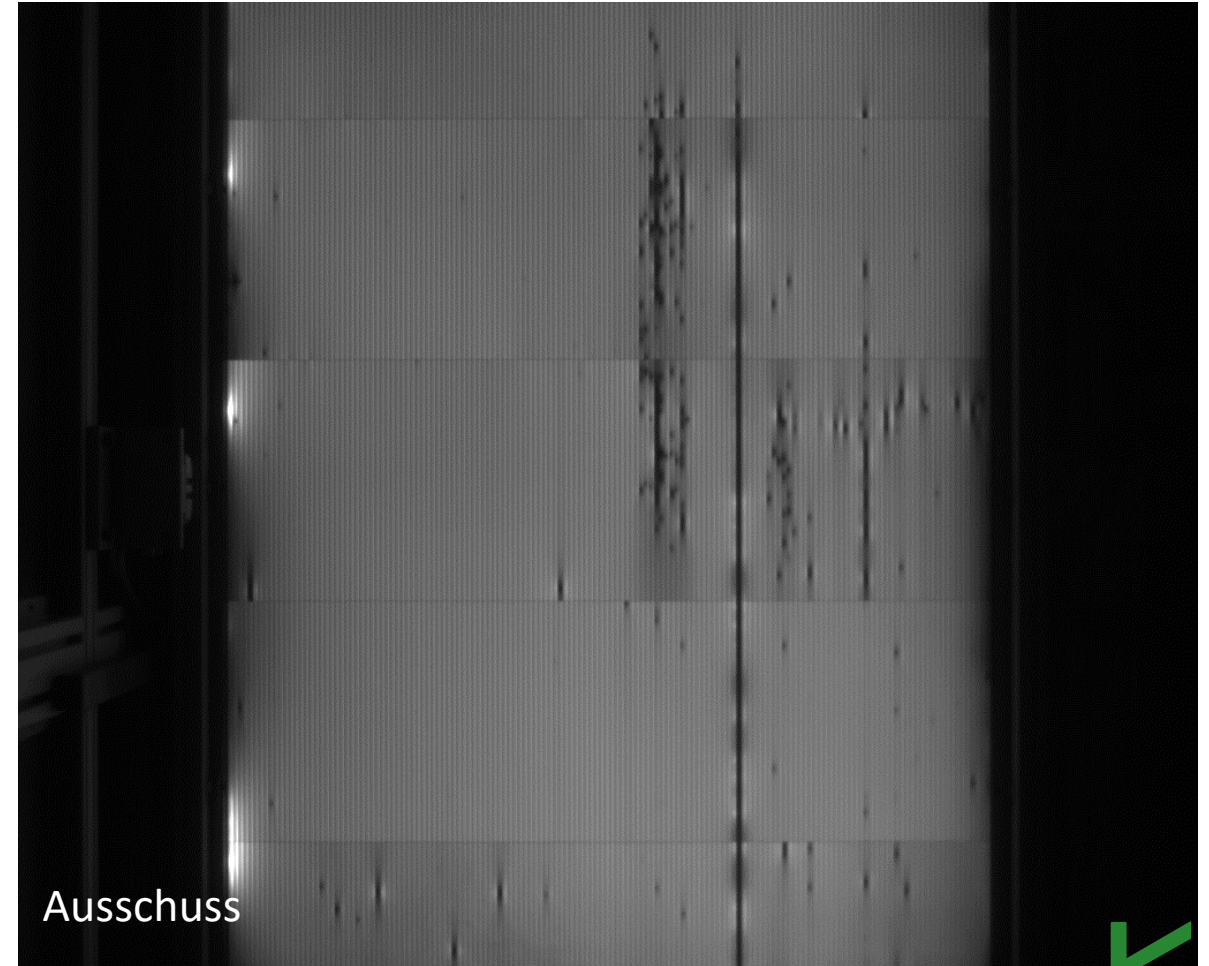


Foto: Solibro GmbH

# Automatische Sichtprüfung von Solarmodulen



Bilder von Modulen gleicher Kategorie unterscheiden sich teilweise erheblich

- + Helligkeit und Kontrast
- + Unterschiedliche kleinere Abweichungen
- + Unterschiedliche Fehlerbilder

Varianz in den Bildern erfordert den Einsatz von Algorithmen, die mit dieser Varianz umgehen können

In diesem Projekt werden Neuronale Netze zur automatischen Sichtprüfung eingesetzt

Zur sicheren und schnelleren Verarbeitung wird vorab eine Signalvorverarbeitung durchgeführt

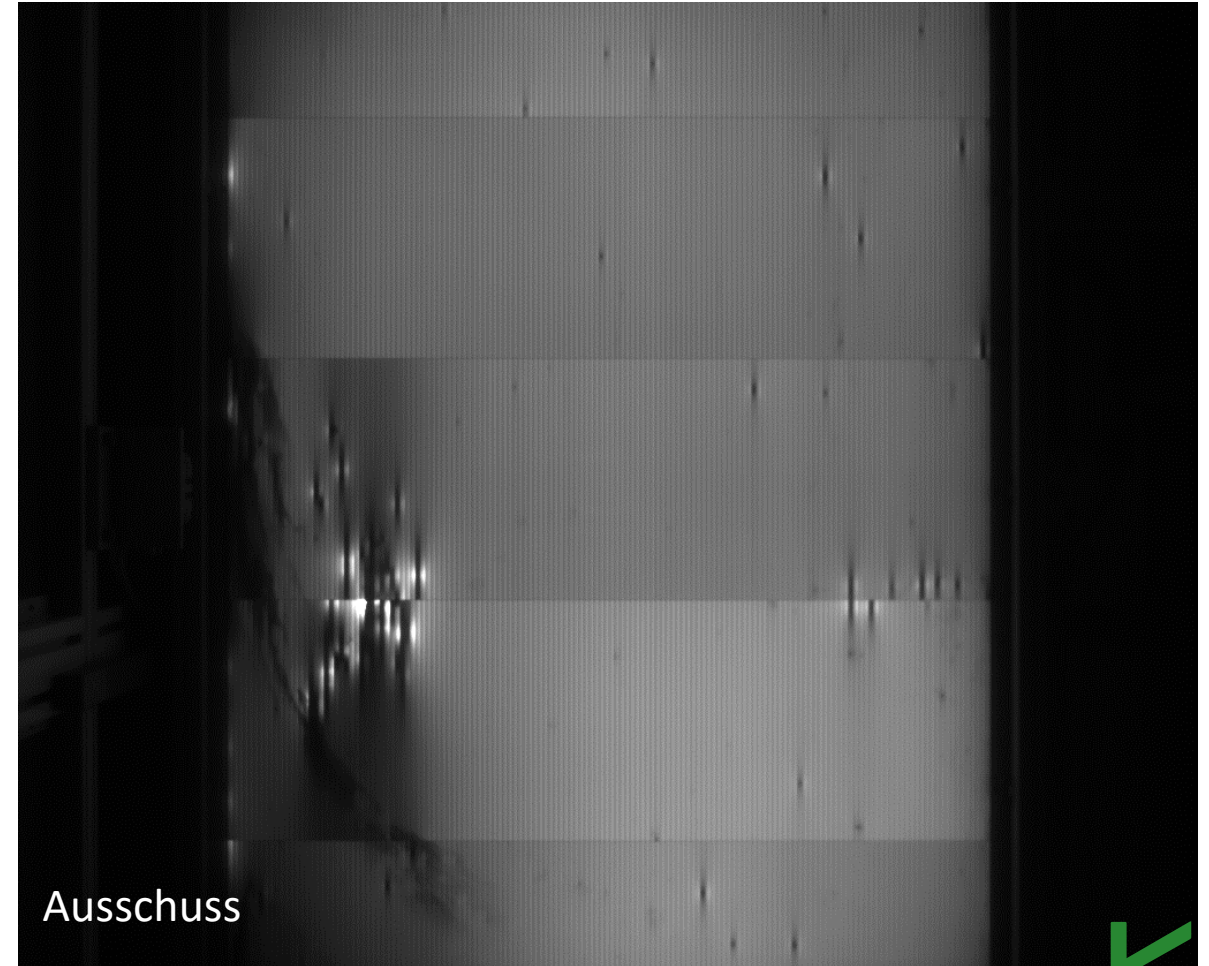


Foto: Solibro GmbH

# Bildvorverarbeitung

Reduktion der Speichertiefe und Normalisierung der Helligkeit

Digitale Aufnahmen weisen eine Größe von 1024 x 1024 Pixeln auf

Entfernung von Rändern

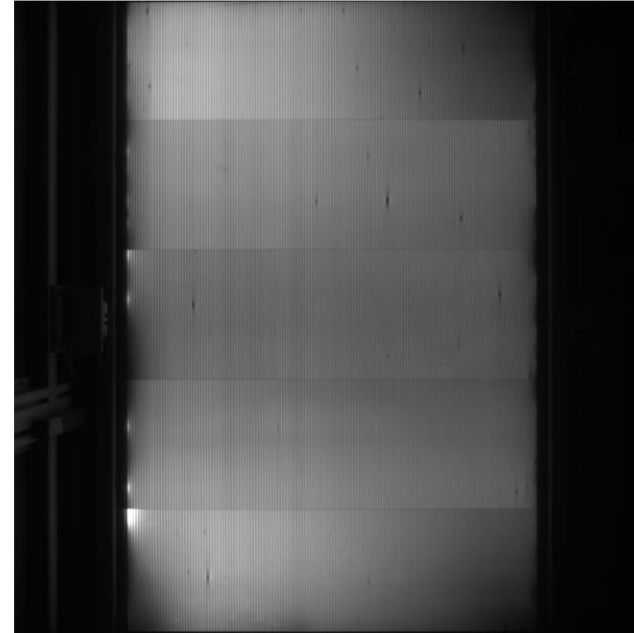
Module bestehen aus einzelnen Streifen, bei denen einzelne Unterbrechungen oder Kurzschlüsse sicher festgestellt werden müssen

Auflösung auf 256 x 128 Pixel ist ausreichend, um diese Fehler zu erkennen

Reduktion des Datenumfangs um einen Faktor 32 führt zur schnelleren Bearbeitung und zu kleinerem Neuronalem Netz

Helligkeitsunterschiede führen zu einer schlechten Nutzung des verfügbaren Zahlenbereichs, Normierung der Helligkeit vereinheitlicht den genutzten Zahlenbereich

Ursprüngliche  
Aufnahmen



Verwendetes  
Datenformat

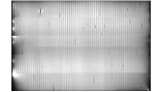
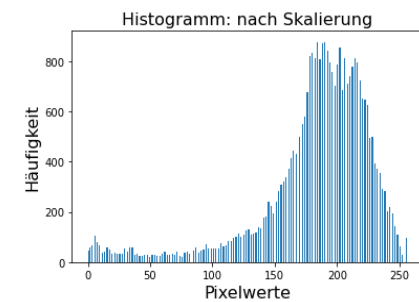
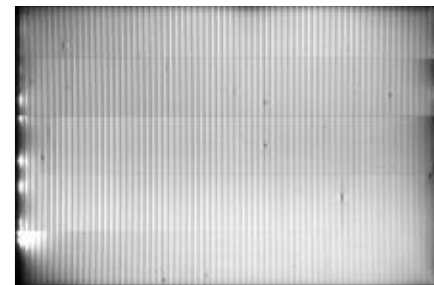
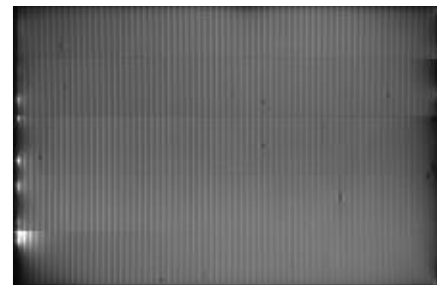
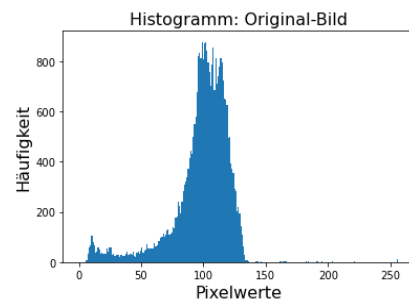
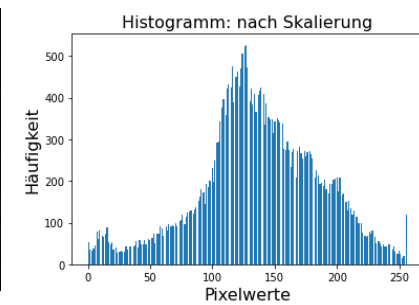
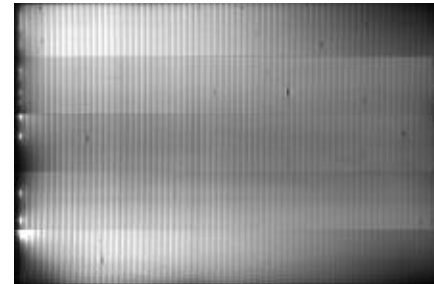
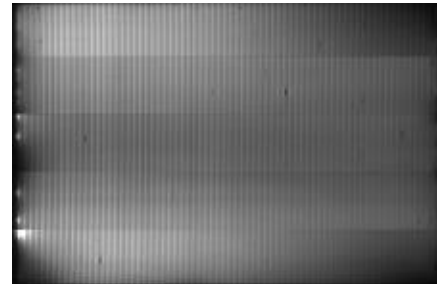
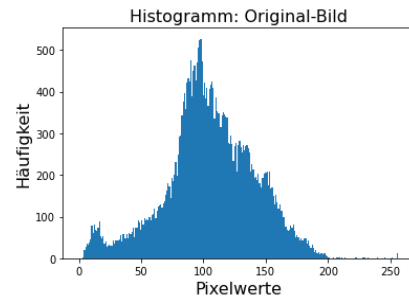
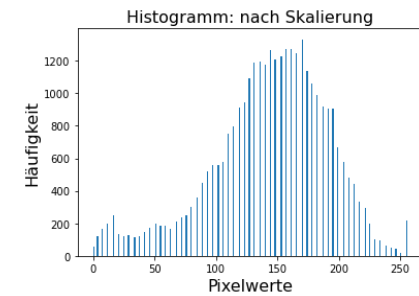
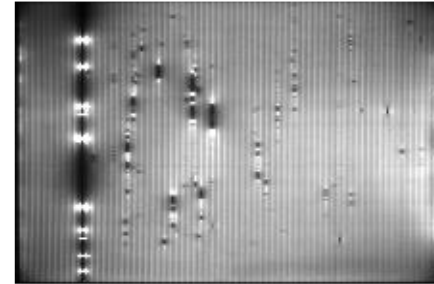
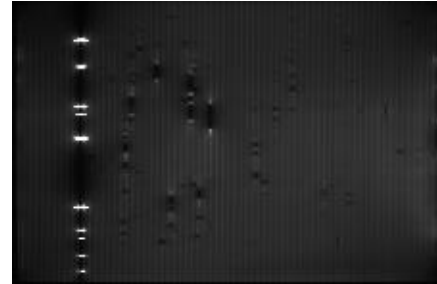
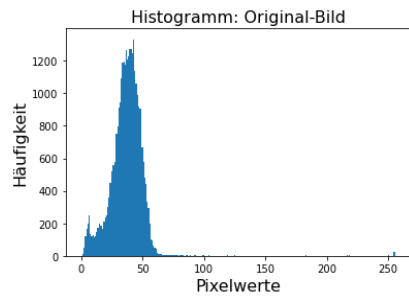


Foto: Solibro GmbH



# Bildvorverarbeitung

## Reduktion der Speichertiefe und Normalisierung der Helligkeit



# Bildvorverarbeitung

## Erweiterung des Datensatz durch Transformationen

Datensätze weisen typischerweise sehr viele Daten von guten Teilen und weniger Daten von Ausfall- oder Premiumteilen auf

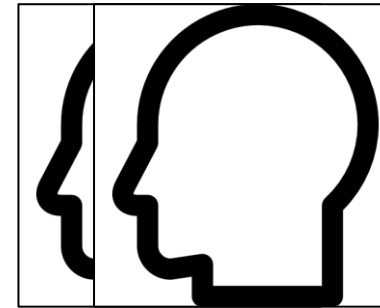
Training von Neuronalen Netzen mit diesen ungleichmäßig verteilten Daten führt zu Netzen, die im Extremfall alle Teile als Gutteile erkennen

Für das Training Neuronaler Netze werden balancierte Datensätze benötigt, die für alle Klassen identische Umfänge besitzen

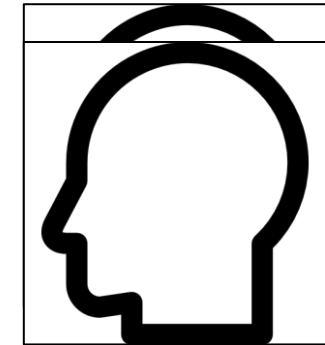
Transformationen von Bildern in den Klassen der Ausfallteile und Premiumqualität führt zu nahezu identisch besetzten Klassen



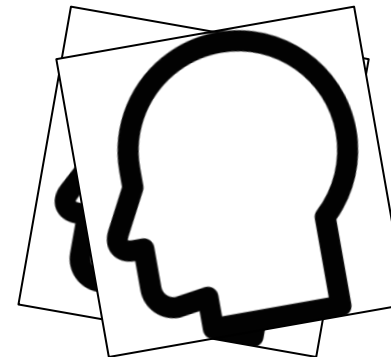
Verschiebung rechts / links



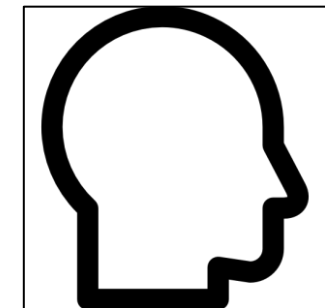
Verschiebung oben / unten



Drehung rechts / links



Spiegelung



# Bildvorverarbeitung



Erweiterung des Datensatz durch Transformationen

Qualität	Transformation	Anzahl nach Erweiterung
Ausschuss	Verschiebung des Bildes um zwei Pixel nach rechts / links und oben / unten	161 592
	Drehung des Bildes um 3 ° nach rechts / links	
	Horizontale Spiegelung	
	Kombination einzelner Maßnahmen	
Standard Qualität	Verschiebung des Bildes um zwei Pixel nach rechts / links	159 903
Premium Qualität	Verschiebung des Bildes um zwei Pixel nach rechts / links	168 800
	Drehung des Bildes um 3 ° nach rechts / links	
	Horizontale Spiegelung	
	Kombination einzelner Maßnahmen	





# Neuronale Netze



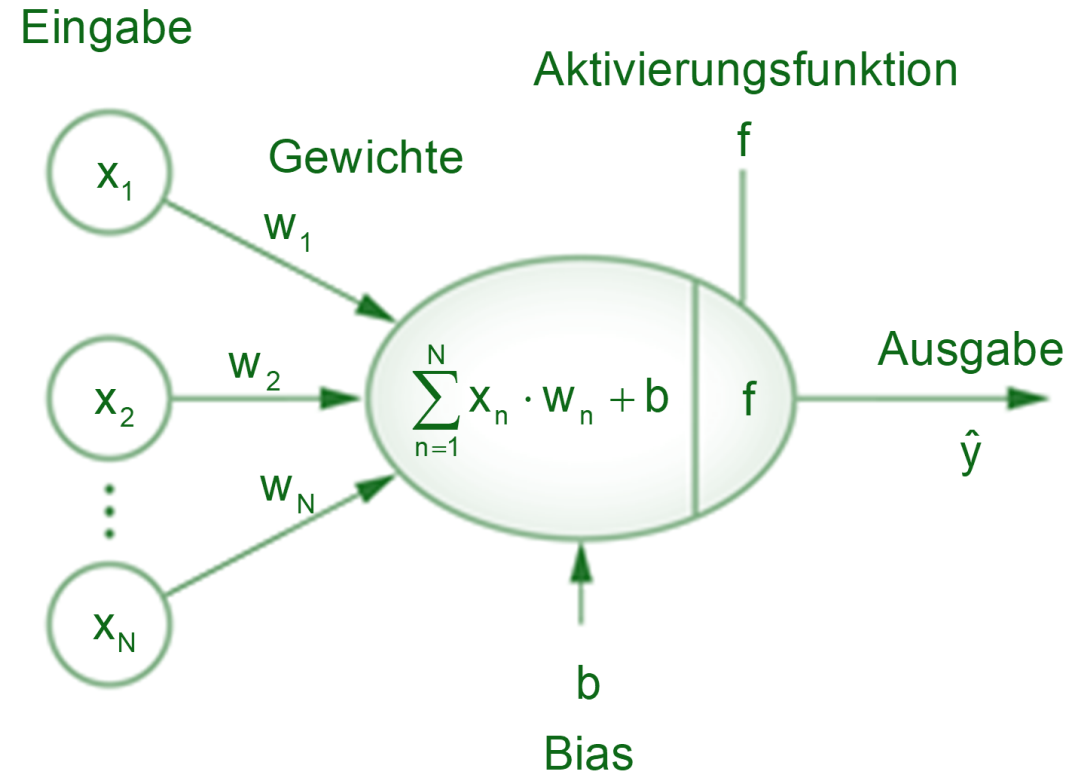
## Neuron als Grundbaustein eines Neuronalen Netzes

Neuronale Netze stellen einen wichtigen Zweig im Bereich der künstlichen Intelligenz dar und sind wegen ihrer universellen Approximationsfähigkeit vielseitig einsetzbar

Neuronaler Netze bestehen aus einzelnen Neuronen, die durch eine Anordnung in sogenannten Layern ein tiefes Neuronales Netz bilden

Gewichtungsfaktoren  $w_n$  und Bias  $b$  werden im Rahmen eines Trainings an die Aufgabenstellung angepasst

Aktivierungsfunktion  $f$  entscheidet über die Reaktion des Neurons



Grafik: Norbert Gatz

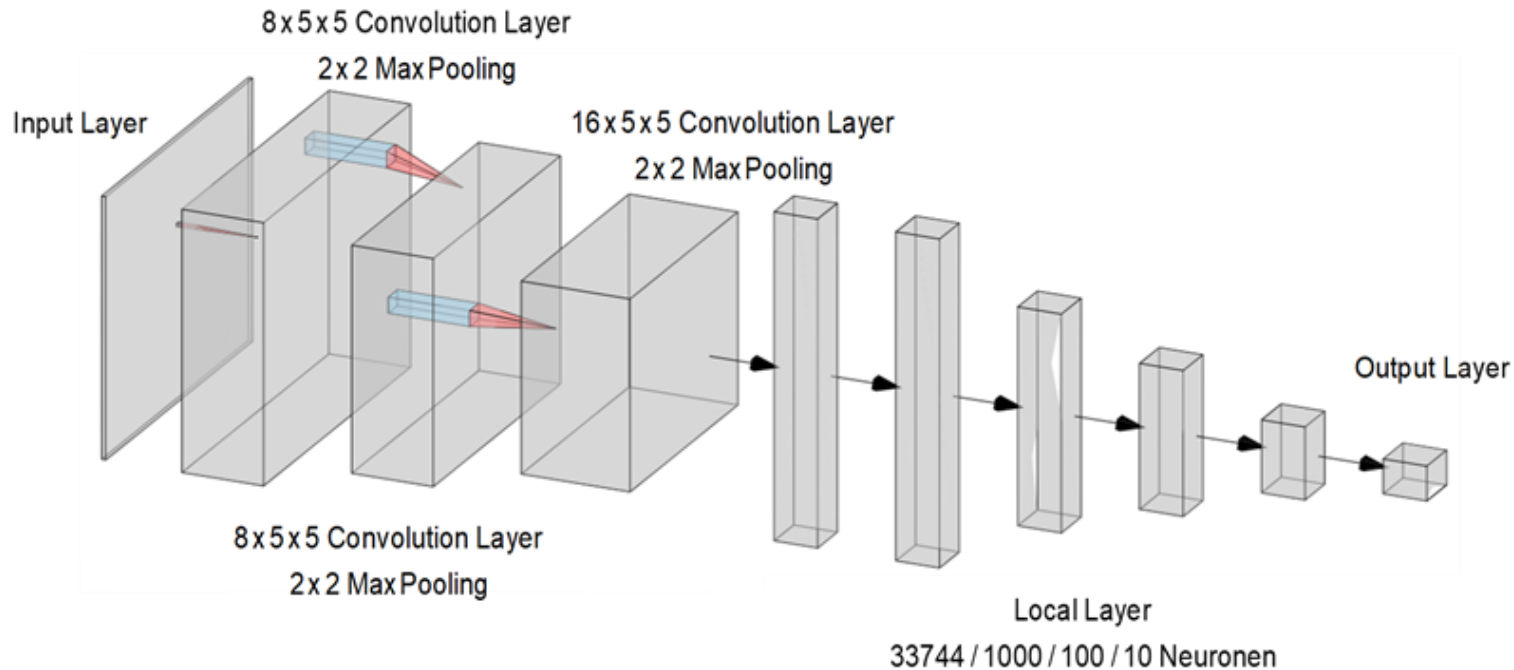
# Neuronale Netze



## Faltungsnetze zur Bildverarbeitung

Bildverarbeitung erfolgt typischerweise durch eine parallele und serielle Kombination von Neuronen in sogenannten Faltungsnetzen (Convolutional Neural Networks)

Vielzahl von Neuronen erfordert einen großen Trainingsdatensatz



# Neuronale Netze

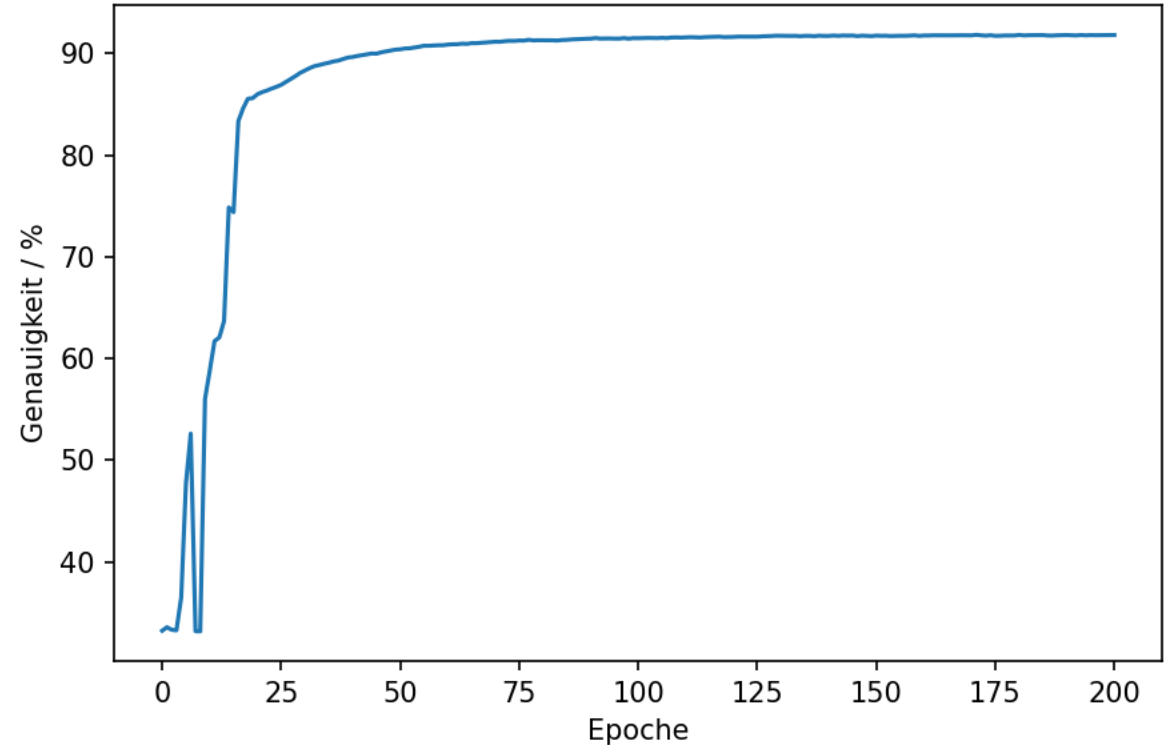
## Training und Test des Neuronalen Netzwerks

Training erfolgt mit vorverarbeiteten und klassifizierten Aufnahmen

Trainingsdatensatz nutzt typischerweise einen Umfang von 80 % des Datenmaterials

- + Initialisierung des Netzes
- + Rekursive Analyse des Verhaltens und Korrektur der Parameter in Teildatensätzen (Batch)
- + Mehrfache Wiederholung des Trainings mit kompletten Durchläufen aller Daten (Epoche)
- + Abbruch des Trainings bei stabiler Genauigkeit des Netzes, in diesem Beispiel nach 200 Epochen

Test erfolgt mit Bildern, die nicht zum Training verwendet wurden, typischerweise mit 20 % des Bildmaterials



# Neuronale Netze

## Training und Test des Neuronalen Netzwerks

Güte des trainierten Neuronalen Netzes wird mit einem Testdatensatz evaluiert

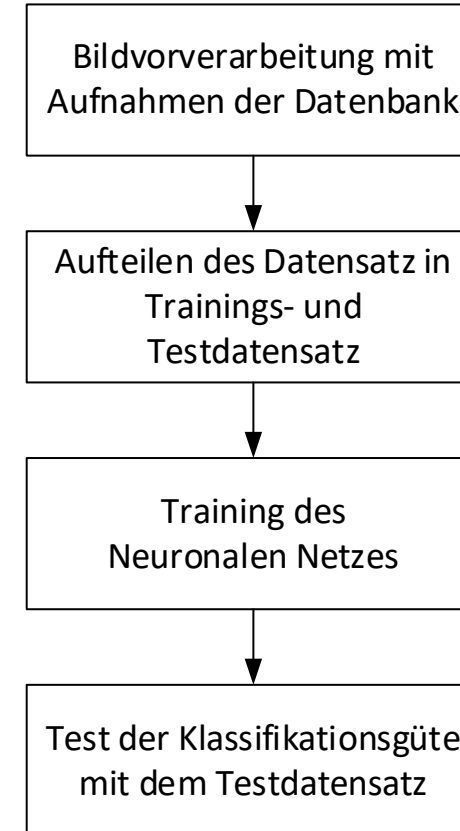
Erste Bewertung mit Konfusionsmatrix

Wirklichkeit	Klassifikation		
	Standard	Ausschuss	Premium
Standard	91.27 %	1.67 %	7.06 %
Ausschuss	7.45 %	90.93 %	1.62 %
Premium	1.28 %	7.40 %	91.32 %

Fehlklassifikationen bei manueller Sichtprüfung limitieren die Genauigkeit des Klassifikationsergebnisses

Korrektur der manuellen Sichtprüfung, Identifikation von Grenzfällen über Aussagesicherheit

## Datenfluss Training und Test



# Neuronale Netze



## Optimierung des Neuronalen Netzwerks

Klassifikationsergebnis abhängig von Hyperparametern

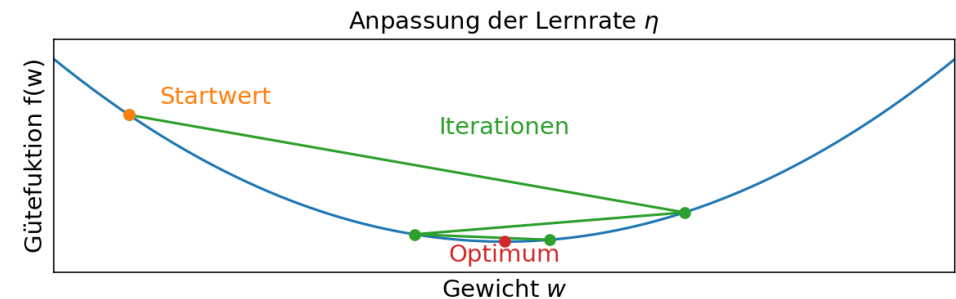
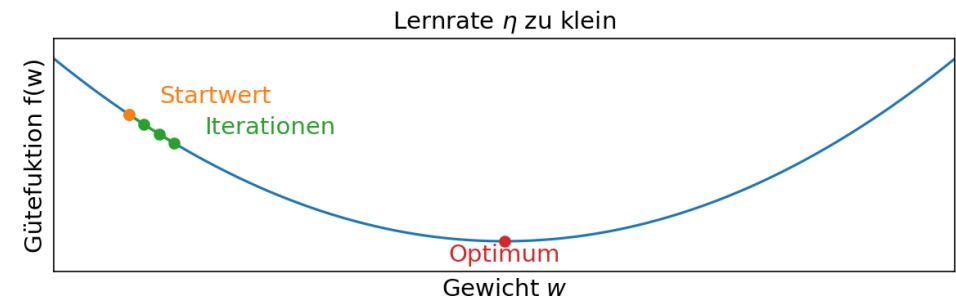
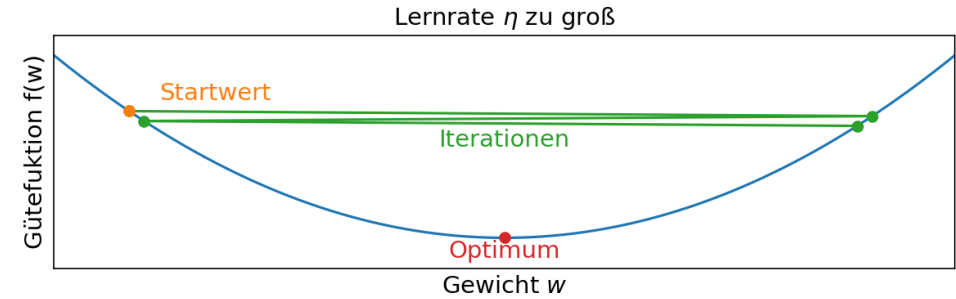
- + Netzarchitektur, Anordnung und Anzahl Neuronen
- + Trainingsrandbedingungen

Trainingsrandbedingungen haben einen Einfluss auf die Geschwindigkeit und die Güte des Trainings

- + Lernrate  $\eta$  bestimmt die Schrittweite, die bei einem Lernschritt umgesetzt wird
- + Decay Factor  $\rho$  bestimmt, wie stark die Lernrate über den Lernprozess abnimmt

Trainingsrandbedingungen sind von der individuellen Aufgabenstellung abhängig und können nicht verallgemeinert werden

Optimierung der Trainingsrandbedingungen



# Neuronale Netze

## Optimierung des Neuronalen Netzwerks

Optimierung der Hyperparameter  $\lambda$  mit dem Particle Swarm Algorithmus

Berechnung einer neuen Einstellung über Veränderung  $v$

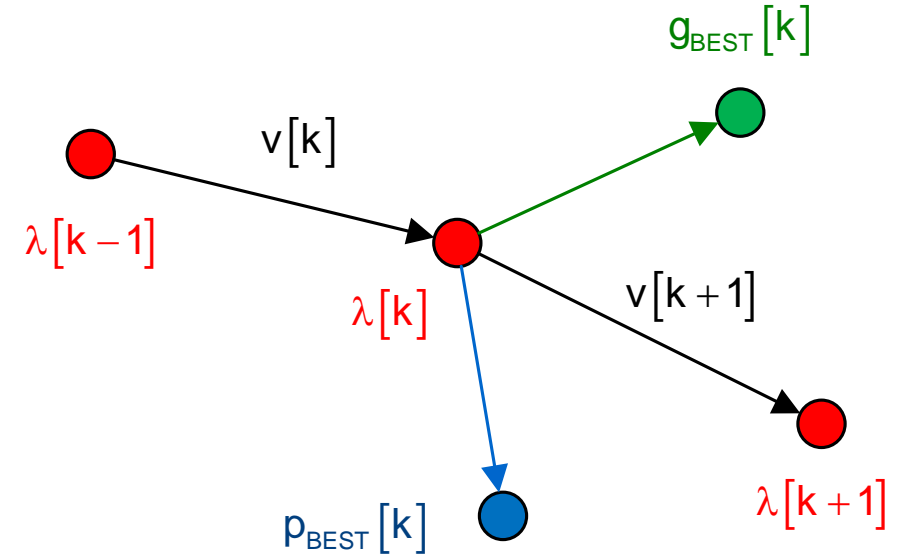
$$\lambda[k+1] = \lambda[k] + v[k+1]$$

Veränderung setzt sich aus 3 Komponenten zusammen

- + Alte Veränderung, Trägheit der Bewegung
- + Abstand zum besten Wert des Individuums, particle best
- + Abstand zum besten Wert aller Individuen, global best

$$v[k+1] = w \cdot v[k] + c_1 \cdot r_1 \cdot (p_{\text{BEST}}[k] - \lambda[k]) + c_2 \cdot r_2 \cdot (g_{\text{BEST}}[k] - \lambda[k])$$

Statistische Variation der Koeffizienten



# Neuronale Netze

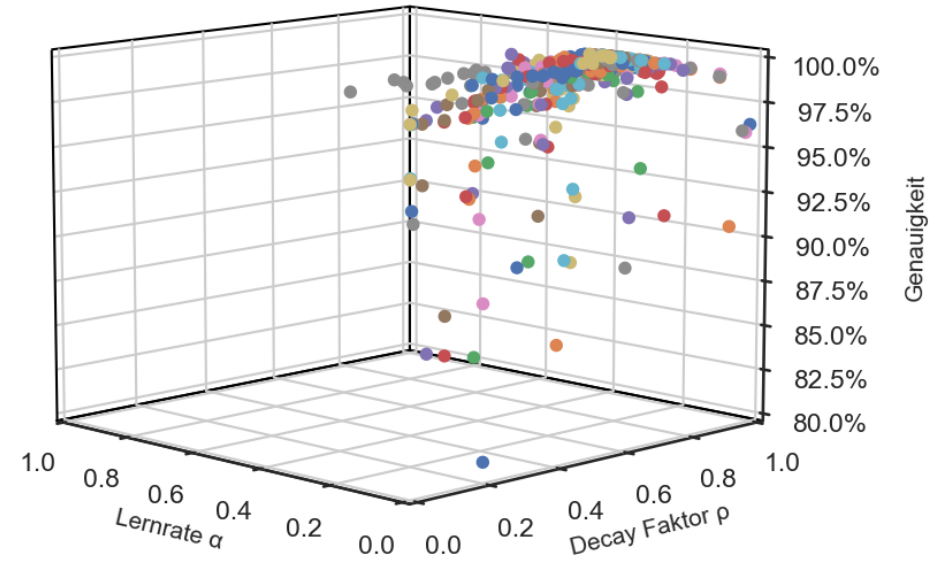
## Optimierung des Neuronalen Netzwerks

Verbesserung des Klassifikationsergebnisses

- + Reklassifizierung des Datensatzes
- + Optimierung Hyperparameter mit dem Particle Swarm Algorithmus

Wirklichkeit	Klassifikation		
	Standard	Ausschuss	Premium
Standard	99.48 %	0.10 %	0.42 %
Ausschuss	0.09 %	99.05 %	0.86 %
Premium	0.40 %	0.16 %	99.44 %

Unterschiedliche Einteilung von Trainings- und Testdatensatz bestätigt die Robustheit des Modells



# Automatische Sichtprüfung von Solarmodulen



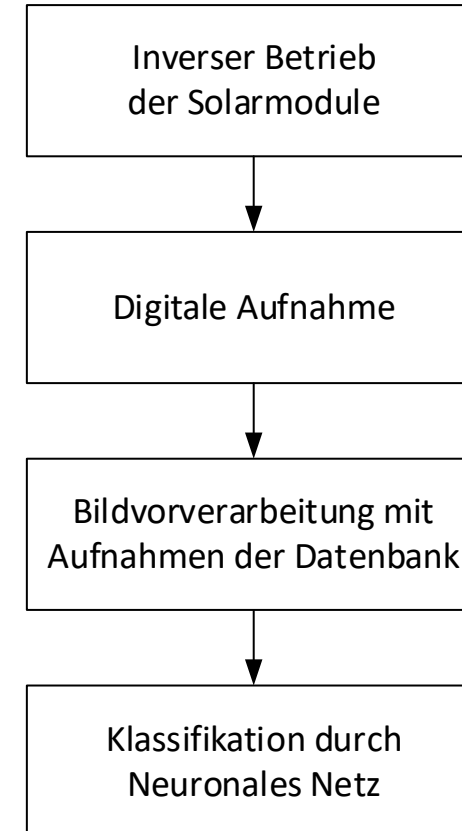
Trainierter Algorithmus wird zur automatischen Sichtprüfung von Solarmodulen eingesetzt

Im normalen Betrieb findet kein Lernen statt, deshalb ist der Rechenaufwand im laufenden Betrieb klein

Im Betrieb entstehen neue Datensätze, die zum Retraining des Netztes verwendet werden können

- + Sicher klassifizierte Stichproben können direkt Datensatz übernommen werden
- + Grenzfälle werden nachklassifiziert und dann übernommen
- + Verbesserung des Klassifikationsergebnisses

Datenfluss Automatische Sichtprüfung





# Qualität 4.0 und Machine Learning

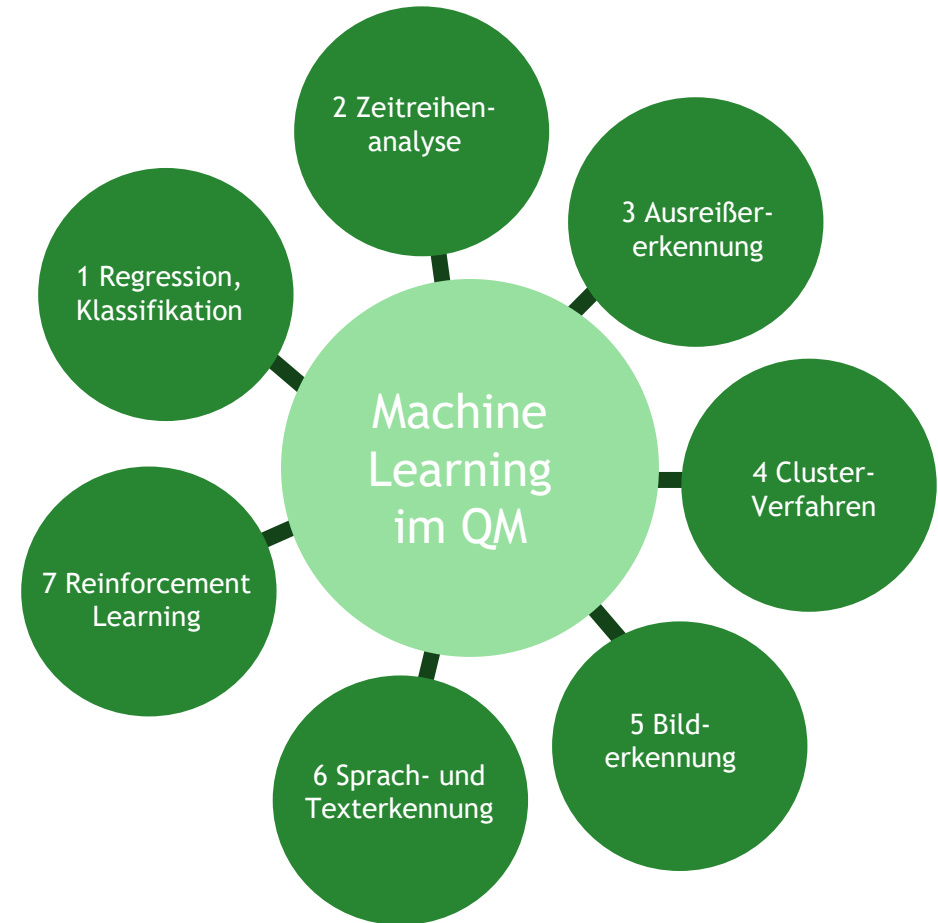


Automatische Sichtprüfung in nur ein Anwendungsfall für Machine Learning im Qualitätsmanagement

Voraussetzung für den erfolgreichen Einsatz

- + Klare Zielvorstellung
- + Aussagekräftige und konsistente Daten, Datenbeschaffung, Datenaufbereitung
- + Know-how im Bereich Data Science
- + IT-Infrastruktur
- + Standards zur konsequente Projektumsetzung

Weitere Use Cases sind in unserem Buch „Die digitale Transformation des Qualitätsmanagements“ beschrieben



Grafik: successfactory management coaching gmbh

**Hochschule Karlsruhe**  
University of  
Applied Sciences

Fakultät für  
**Elektro- und**  
**Informationstechnik**

[www.h-ka.de](http://www.h-ka.de)

