

Bachelorarbeit

vorgelegt von

Vipin Singh

Bachelorstudiengang Mathematik

Fakultät Vermessung, Informatik und Mathematik

Sommersemester 2022

Entwicklung eines deflektometrischen Prüfaufbaus für spiegelnde Prüfobjekte

ErstprüferIn:
ZweitprüferIn:

Prof. Dr.-Ing. Uwe Müßigmann, Hochschule für Technik Stuttgart
Dipl.-Ing. Sebastian Lichtenberg, NeuroCheck GmbH

Zusammenfassung

Inhaltsverzeichnis

Zusammenfassung	2
Inhaltsverzeichnis	3
Abbildungsverzeichnis	4
Abkürzungsverzeichnis	5
1 Einführung	5
1.1 Einführung in die Deflektometrie	6
1.1.1 Rekonstruktion von spiegelnden Oberflächen	6
1.1.2 Qualitative Sichtprüfung	8
2 Sichtprüfung durch Lichtreflexionen	10
2.1 Prüfaufbau	10
2.2 Verfahren	11
3 Deflektometrische Registrierung	14
Quellenverzeichnis	15

Abbildungsverzeichnis

1.1	Aufbau einer Deflektometrie-Prüfstation	7
1.2	Kratzer an Hell-Dunkel-Übergang eines Streifenmusters	9
2.1	Prüfaufbau	10
2.2	Lichtbrechung an einem Kratzer	11
2.3	Kratzer	12
2.4	Eingravierung im Glas	12

Kapitel 1

Einführung

Durch die optischen Besonderheiten von spiegelnd glänzenden Oberflächen treten solche in der Industrie an vielen Stellen auf. Speziell in der Automobilindustrie werden täglich große Karosserieflächen glänzend lackiert. Alleine in Deutschland wurden in den Jahren von 1990 bis 2021 im Durchschnitt ungefähr 5 Millionen Personenkraftwagen pro Jahr produziert. [1] Ein großer Teil der Fahrzeuge erhalten nach der Lackierung eine spiegelnde Oberfläche. Solche Oberflächen müssen durch besondere Verfahren auf Defekte überprüft werden. Dabei sorgen spekulare Reflexionen dafür, dass die Oberflächen nicht direkt, sondern über ihre Spiegelbilder der Umgebung betrachtet werden.

Die riesige Menge an Oberflächen macht es für die Qualitätssicherung unumgänglich die Prüfung durch automatisierte Prozesse zu integrieren. Dabei stoßen die üblichen Verfahren der industriellen Bildverarbeitung auf ihre Grenzen, sodass neue Methoden eingeführt werden müssen. Diese speziellen Anwendungen erfordern den Einsatz von deflektometrischen Prüfaufbauten. In der Industrie sind solche Verfahren schon seit Längerem zur Analyse der Topographie von spiegelnden Freiformflächen etabliert. Deflektometrische Verfahren funktionieren nach einem ähnlichen Prinzip, wie auch die Inspektion von spiegelnden Oberflächen durch Menschen. Das wissenschaftliche Gebiet der Deflektometrie ist auch heute noch Thema für viele Forschungsarbeiten und wird stetig weiterentwickelt.

Im Rahmen der Arbeit werden spekulär reflektierende Objektoberflächen unter Projektion von bekannten Mustern durch eine Kamera aufgenommen, anschließend analysiert und auf Defekte überprüft. Welche Informationen können aus der Beobachtung von Spiegelbildern gewonnen werden? Wie sehen allgemein anwendbare Methoden aus, um spiegelnde Oberflächen erfolgreich zu bewerten? Das Ziel der Arbeit ist es, diese Fragen zu erforschen und aufzuklären. Des Weiteren sollen ein Aufbau, die Ansteuerung von Beleuchtung und Kamera und die notwendige Auswertung des Bildmaterials entwickelt werden, durch welche eine Erkennung von Oberflächendefekten ermöglicht wird. Die Umsetzung soll dabei in Form einer Softwareerweiterung für NeuroCheck erfolgen, eines sogenannten *Plug-ins*.

Während der Arbeit soll außerdem ein bestimmter Sonderfall genauer betrachtet werden - transparente Prüfobjekte. Die Problematik ist dabei, dass man ohne Weiteres kein sichtbares Muster auf die Oberfläche projizieren kann. Dafür gibt es verschiedene Lösungsansätze

wie z. B. die Auftragung einer undurchsichtigen Beschichtung. Eine andere Möglichkeit ist eine Veränderung in der Beleuchtungskomponente. Anstatt ein Muster auf das Objekt zu projizieren, kann man eine Durchlichtbeleuchtung nutzen. Das heißt, dass man auf einem Bildschirm unter dem transparenten Prüfobjekt verschiedene Muster anzeigt.

Durch die aufgenommenen Muster können Aussagen über die Oberflächenbeschaffenheit getroffen werden. Abhängig von den verwendeten Mustern und der Auswertung sollen damit bestimmte Fehlstellen kenntlich gemacht werden. Als Fehlstellen gelten Verformungen und Oberflächendefekte wie z. B. Dellen, Kratzer oder matte Stellen.

1.1 Einführung in die Deflektometrie

Definition 1.1: Deflektometrie

Die Deflektometrie bezeichnet allgemein alle Methoden zur berührungslosen optischen Erfassung von Gestaltinformationen spiegelnder Oberflächen durch automatische Auswertung von Spiegelbildern bekannter Szenen. [2]

Diese Definition öffnet ein großes Gebiet für verschiedene Verfahren und Anwendungen. Die Verfahren der Deflektometrie sind auch heute noch Themen für viele Forschungsarbeiten. Im Folgenden soll dabei auf den Stand der Technik der Deflektometrie eingegangen werden.

1.1.1 Rekonstruktion von spiegelnden Oberflächen

Bei der Recherche zur allgemeinen Deflektometrie fällt auf, dass das Hauptforschungsgebiet der gegenwärtigen Deflektometrie die Generierung von dreidimensionalen Modellen von spiegelnden Objektoberflächen ist. Der Aufbau eines solchen Anwendungsfalls sieht eine Beleuchtungseinheit (z. B. einen Bildschirm), ein Sensor (z. B. eine Kamera) und ein zu untersuchendes Objekt vor.

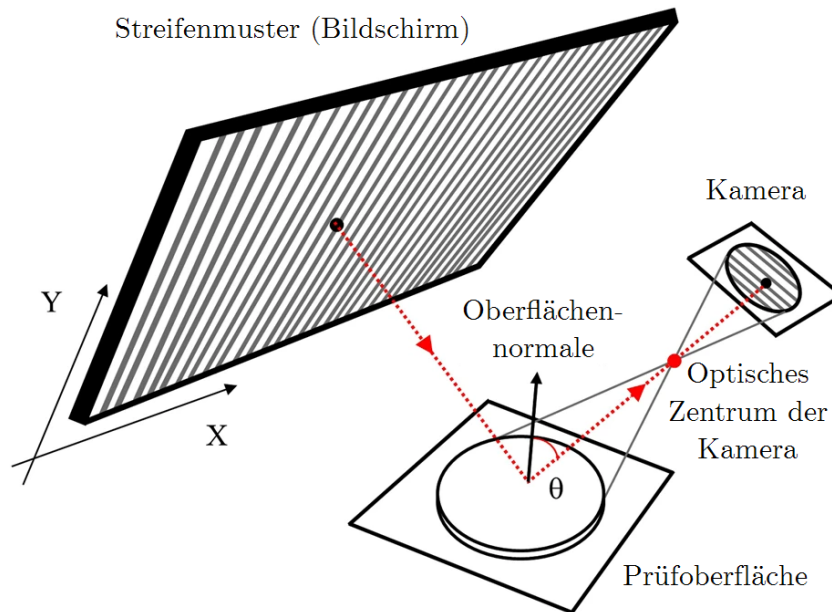


Abbildung 1.1: Aufbau einer Deflektometrie-Prüfstation. *in Anlehnung an [3]*

Wie in Abbildung 1.1 angedeutet, wird ein Muster auf ein Prüfobjekt projiziert und anschließend von einer Kamera aufgenommen. Für dieses Verfahren werden zur Projektion üblicherweise Streifenmuster gewählt, deren Grauwertverläufe in ihren Ausbreitungsrichtungen einer Sinus-Funktion entsprechen. Das grundlegende Prinzip basiert darauf, dass jeder Punkt des Objekts dem richtigen Punkt auf dem Bildschirm zugeordnet wird. Dabei ordnet man jedem Pixel des projizierten Musters, das man über die Kamera aufnimmt, sein zugehöriges Pixel des erzeugten Musters auf dem Bildschirm zu. Der Vorteil bei sinusförmigen Streifenmustern ist, dass man für die Punkte des Objekts jeweils den Phasenwinkel im sinusförmigen Muster berechnen kann. Dies erleichtert die Zuordnung von Kamera- und Bildschirmpunkten. Durch diese Zuordnung von Kamera- und Bildschirmpunkten lassen sich Neigungsinformationen der Oberfläche berechnen. Dies kann durch Strahlenverfolgungen erreicht werden. In Abbildung 1.1 lässt sich das über die in Rot eingezeichneten Vektoren erkennen.

Am Punkt des Auftreffens des Lichtstrahls auf das Objekt wird es auf eine bekannte Stelle in die Kamera reflektiert. Nimmt man zusätzlich die Informationen über den Systemaufbau hinzu bzw. führt eine Systemkalibrierung durch, kann aus der Zuordnung von Kamera- und Bildschirmpunkten der Reflexionswinkel θ aus Abbildung 1.1 berechnet werden. Da bei einer Reflexion die Lichtstrahlen genau an der Oberflächennormalen gespiegelt werden, lässt sich dann in einem weiteren Schritt die Oberflächennormale in diesem Punkt bestimmen. Führt man dies für jeden Punkt im Kamerabild durch, erhält man daraus die Neigungsinformationen des zu prüfenden Objektes in der Form eines Normalenfelds.

Schließlich ist es möglich, aus diesem Normalenfeld räumliche Information der Oberfläche zu berechnen. Dafür kann man zunächst aus den Normalenvektoren die zugehörigen Tangentialebenen berechnen, die über je zwei Richtungsvektoren definiert sind. Diese Rich-

tungsvektoren bilden die Tangentialfelder des Prüfobjekts. Man kann über eine Integration der Tangentialfelder in ausgewählte Richtungen Kurven bestimmen, die in der Oberfläche des Objekts liegen. Durch diese Integration erhält man einen Höhenzusammenhang der Oberflächenpunkte. Wenn zusätzlich ein Oberflächenpunkt gegeben ist, kann man die berechneten dreidimensionalen Positionen der Oberflächenpunkte im Raum angeben.[4]

1.1.2 Qualitative Sichtprüfung

Der Bereich der qualitativen Sichtprüfung hat grundlegend die Aufgabe, spiegelnde Oberflächen nach bestimmten Kriterien in gut und fehlerhaft zu unterteilen. Die Aufbauten für solche Verfahren sehen in der Regel ähnlich aus wie auch in Abbildung 1.1. Zur Analyse dieser spiegelnden Oberflächen ist es nicht unbedingt nötig, ein dreidimensionales Oberflächenmodell zu erzeugen. Ein wesentlicher Unterschied ist deshalb, dass die Informationen über den Systemaufbau nicht zwingend notwendig für Berechnungen sind. Um eine möglichst allgemeine Lösung zu entwickeln, ist dies ein essenzieller Vorteil. Die Vorgehensweise bei diesen Verfahren basiert in den meisten Fällen darauf, die Abweichungen der Oberflächenstruktur zu einem Referenzobjekt zu bewerten. Abhängig von den einzelnen Oberflächenmerkmalen können verschiedene Muster und Strategien zur Auswertung eingesetzt werden.

In seiner Dissertation „Deflektometrie zur automatischen Sichtprüfung und Rekonstruktion spiegelnder Oberflächen“ [4] listet Stefan Bruno Werling vom Karlsruher Institut für Technologie einige Auswertungsmöglichkeiten auf. Daraus sind die Folgenden eine Auswahl seiner Strategien:

- Untersucht man auf der Oberfläche eines Objekts ein sinusförmiges Streifenmuster, dann können im Frequenzraum Abweichungen des Musters von einem „Idealmuster“ bzw. Referenzmuster festgestellt werden. Dadurch entdeckt man Unterschiede in der Oberflächenkrümmung. Die Transformation des Bildes in den Frequenzraum wird durch die Fourier-Transformation erreicht.
- Nutzt man zur Auswertung ein Schachbrettmuster, so können durch die Wahl eines geeigneten Schwellwerts bestimmte Flächen segmentiert und geometrisch analysiert werden. Nach der Analyse sollen Anomalien der geometrischen Merkmale Aussagen über die Krümmung treffen.
- Besonders kleine Fehler und Defekte der Oberflächenstruktur lassen sich an Hell-Dunkelübergängen gut hervorheben. Hierfür kann man einfache Streifenmuster analysieren, wie es in Abbildung 1.2 gezeigt ist.

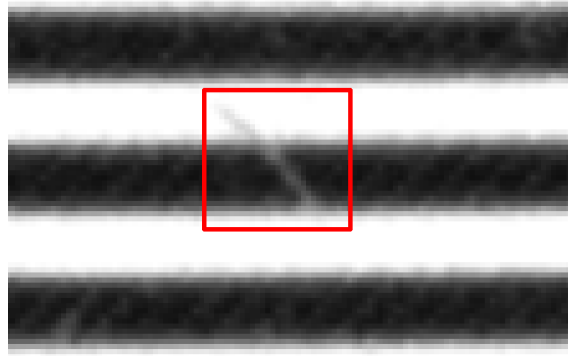


Abbildung 1.2: Kratzer an Hell-Dunkel-Übergang eines Streifenmusters

Durch die Variabilität der Deflektometrie und der offenen Definition der qualitativen Sichtprüfung lassen sich z. B. durch Veränderung des Musters zahlreiche verschiedenste Verfahren aufstellen, um eine Objektoberfläche zu analysieren. Aus dem Grund kann keine allgemeine Funktionsweise von deflektometrischen Verfahren für die qualitative Sichtprüfung beschrieben werden.

Kapitel 2

Sichtprüfung durch Lichtreflexionen

2.1 Prüfaufbau

Die folgende Abbildung soll eine Skizze des verwendeten Prüfaufbaus zeigen. Die Skizze ist zur Vereinfachung ohne Halterungen erstellt worden.

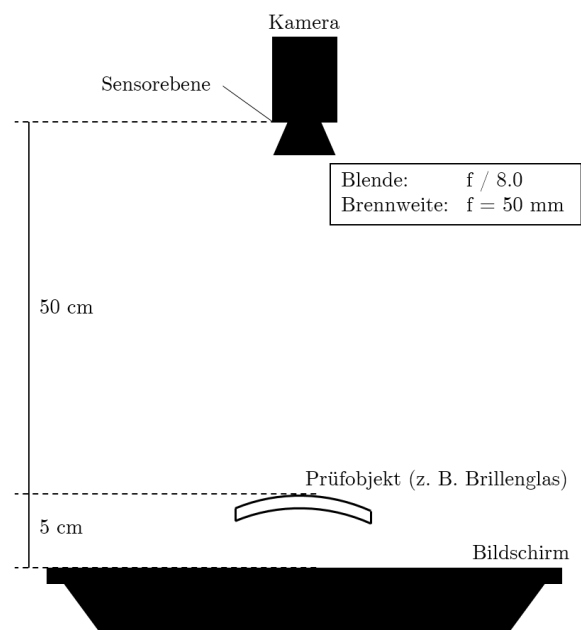


Abbildung 2.1: Prüfaufbau (Abbildung nicht maßstabsgetreu)

Die Parameter des Prüfaufbaus wie z. B. Kameraeinstellungen und Entfernungen lassen sich aus Abbildung 2.1 entnehmen. Es gilt zu beachten, dass die Entfernung zur Kamera nicht am Objektiv, sondern an der Sensorebene gemessen wird. Der Grund liegt darin, dass Objektive keine festgelegte Größe haben, weshalb die Entfernung andernfalls für verschiedene Objektive unterschiedlich sein würde. Die Sensorebene einer Kamera ist die Position des Kamerasensors, an der das einfallende Licht aufgenommen wird. Dieser Aufbau wird zur Erzeugung von Bildmaterial für diesen Projektbericht verwendet. Zur Auswertung und

Verknüpfung des Bildmaterials wird die NeuroCheck-Software eingesetzt. Die Prüfobjekte sind transparente Brillengläser mit Eingravierungen und einzelnen Fehlstellen.

2.2 Verfahren

Der erste Prototyp soll es ermöglichen, Kratzer und ähnliche Defekte auf transparenten Objekten mittels der Deflektometrie sichtbar zu machen. Der Ansatz zur Erkennung basiert auf der Idee aus Abbildung 1.2. Dabei nutzt man die abweichende Lichtreflexion an Kratzern und Defekten im Vergleich zur idealen spiegelnden Oberfläche des Objekts.

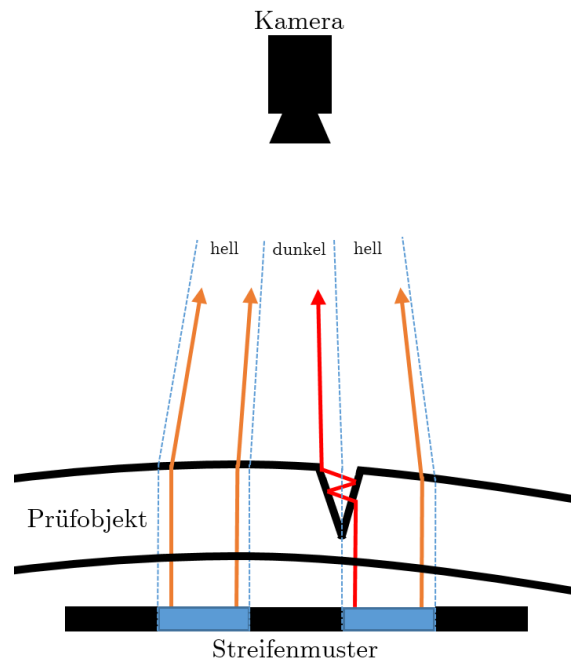


Abbildung 2.2: Lichtbrechung an einem Kratzer (Abbildung nicht maßstabsgetreu)

In Abbildung 2.2 wird schematisch die Überlegung hinter dem Ansatz dargestellt. Man nimmt ein Streifenmuster und projiziert dieses auf ein spiegelndes Prüfobjekt. Für ein transparentes Prüfobjekt kann man das Streifenmuster als Durchlichtbeleuchtung von unten projizieren. An den Hell-Dunkelübergängen fällt Licht vom hellen Streifen in den Kratzer. Durch den Kratzer werden manche Lichtstrahlen so reflektiert, dass diese an der Stelle des dunklen Streifens in die Kamera gelangen. Dadurch erkennt man im Kamerabild eine lokale Fehlstelle, da der Kratzer heller ist als der umliegende dunkle Streifen. Analog dazu erkennt man im hellen Streifen lokal eine etwas dunklere Stelle. Durch Anpassung der Kameraeinstellungen kann man beeinflussen, wie stark man den Kratzer sieht. Z. B. kann dies durch die Erhöhung der Belichtungszeit oder weitere Öffnung der Blende geschehen. Dadurch wird ein Oberflächendefekt im dunklen Streifen zwar besser und stärker sichtbar, allerdings verliert man die Informationen über den Defekt im hellen Streifen. Dies liegt daran, dass auch die dunklere Stelle im hellen Streifen so hell werden kann, dass sie nicht mehr von dem hellen Streifen selbst zu unterscheiden ist. Dieses Problem erkennt man in der Abbildung 2.3.

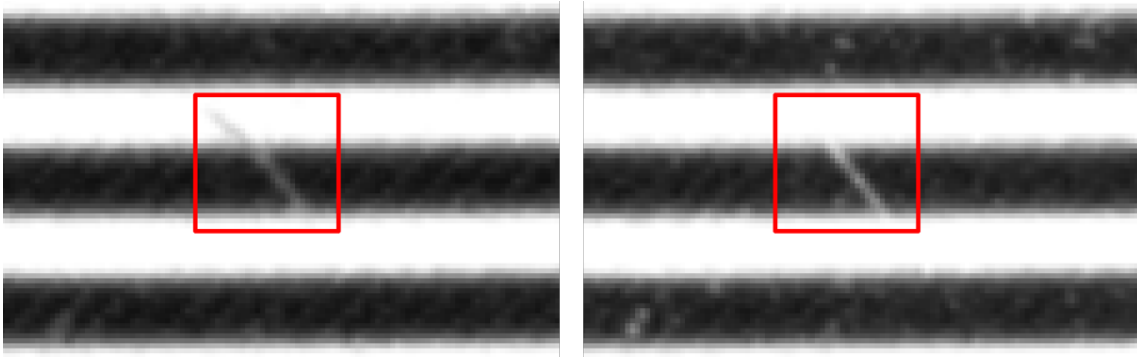


Abbildung 2.3: Kratzer an Hell-Dunkel-Übergang. Links mit weniger weit geöffneten Blende im Vergleich zu rechts.

Trotz der fehlenden Information hat das rechte Bild den Vorteil, dass durch die größere Differenz zwischen dem Oberflächendefekt und dem Hintergrund eine bessere Erkennung möglich ist. Das Problem mit unsichtbaren Teilen der Defekte ist aber nicht nur abhängig von der Kameraeinstellung, sondern auch von dem Oberflächendefekt selbst.



Abbildung 2.4: Schlecht erkennbare Eingravierung im Glas, nach Verschiebung des Streifenmusters.

In Abbildung 2.4 stellt man fest, dass besonders kleine Defekte der Oberflächenstruktur wie hier z. B. die Eingravierung nur zum Teil und auch nur in der Nähe der Übergänge zu erkennen sind.

Daraus lassen sich bestimmte Folgerungen ziehen. Zunächst decken Streifenmuster nur unmittelbar an den Übergängen zuverlässig Defekte auf. Das bedeutet, um Defekte an bestimmten Stellen zu erfassen, muss das verwendete Streifenmuster an den Stellen Übergänge haben. So kann man schließen, dass Muster mit schmalen Streifen besser geeignet sind, um auch kleinere Oberflächendefekte sichtbar zu machen. Allerdings führt dies auch dazu, dass stets nur kleine Teile der Defekte zu erkennen sind. Als Lösung dieses Problems kann man mehrere Streifenmuster verwenden, deren Streifen stets in ihrer Ausbreitungsrichtung verschoben sind. Verknüpft man die sichtbaren Teile der Defekte, kann man ein vollständiges Gesamtbild erhalten. In diesem Gesamtbild sollten alle Oberflächendefekte ab einer bestimmten Mindestdtiefe sichtbar werden. Die Mindestdtiefe hängt dabei von den

Kameraeinstellungen, der Beleuchtungsstärke und den verwendeten Streifenmustern ab.

Kapitel 3

Deflektometrische Registrierung

Definition 3.1: Deflektometrische Registrierung

Die *deflektometrische Registrierung* l_r beschreibt die Abbildung von Bildpunkten zu Schirmpunkten. [4]

$$l_r : A_{Cam} \rightarrow L \cup \emptyset, P_B \rightarrow P_L \quad (3.1)$$

$A_{Cam} \subset \mathbb{R}^2$ bezeichnet die Menge der Bildpunkte bzw. der Kamerapixel. $L \subset \mathbb{R}^2$ bezeichnet die Menge der Schirmpunkte bzw. der Monitorpixel. In Koordinatenschreibweise lässt sich die Abbildung somit darstellen als:

$$l_r : \mathbb{R}^2 \supset A_{Cam} \rightarrow \mathbb{R}^2, (x_B, y_B) \mapsto (x_L, y_L) \quad (3.2)$$

Durch diese Abbildung...

Quellenverzeichnis

- [1] Statista GmbH. *Pkw-Produktion in Deutschland bis 2021*. 2022. URL: <https://de.statista.com/statistik/daten/studie/75210/umfrage/produktion-von-pkw-in-deutschland-seit-1990/> (besucht am 04.04.2022).
- [2] Prof. Dr. Michael Heizmann. *Deflektometrie zur Inspektion spiegelnder Oberflächen*. Fraunhofer-Institut für Optronik. URL: <https://www.vision.fraunhofer.de/de/technologien-anwendungen/technologien/oberflaecheninspektion/deflektometrie-spiegelnder-oberflaechen.html> (besucht am 01.03.2022).
- [3] Hyug-Gyo Rhee Manh The Nguyen Young-Sik Ghim. *Aufbau einer Deflektometrie-Prüfstation*. URL: <https://www.nature.com/articles/s41598-019-39514-6/figures/1> (besucht am 25.02.2022).
- [4] Stefan Bruno Werling. *Deflektometrie zur automatischen Sichtprüfung und Rekonstruktion spiegelnder Oberflächen*. 2011. ISBN: 9783866446878. DOI: 10.5445/IR/1000023290. URL: <https://publikationen.bibliothek.kit.edu/1000023290> (besucht am 02.03.2022).