

# **Prognose über die Stromerzeugung einer Photovoltaikanlage mittels maschinellem Lernen**

Bachelorarbeit

Vorgelegt von

Leopold Schmid

Matrikelnummer:79776

Fakultät für Elektronik und Informatik

Hochschule Aalen

Datum

## Erklärung

## **Verzeichnis häufig verwendeter Symbole und Abkürzungen**

# Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Einführung</b>	<b>4</b>
<b>2</b>	<b>Stand der Technik</b>	<b>6</b>
2.1	Strombedarf in Deutschland	6
2.2	Schwankungen im Stromnetz	6
2.3	Maschinelles Lernen	6
<b>3</b>	<b>Eigene Fragestellung und methodisches Vorgehen</b>	<b>7</b>
<b>4</b>	<b>Wichtige Faktoren bei der Stromerzeugung durch Solarenergie</b>	<b>9</b>
4.1	Wetter-unabhängige Faktoren	9
4.1.1	Schatten	9
4.1.2	Orientierung	10
4.2	Nachgeführte Photovoltaikanlagen	11
4.2.1	Astronomisch nachgeführte Photovoltaikanlagen	12
4.2.2	Sensorisch nachgeführte Photovoltaikanlagen	12
4.3	Wetter-abhängige Faktoren	13
4.3.1	Wolkenarten	13
4.3.2	Relative Luftfeuchtigkeit und Luftdruck	14
4.3.3	Temperatur	15
4.3.4	Wind	16
4.3.5	Sonneneinstrahlung	16
<b>5</b>	<b>Zusammenhänge der Merkmale</b>	<b>21</b>
<b>6</b>	<b>Datenvorverarbeitung</b>	<b>22</b>
6.1	Ausreißer	22
<b>7</b>	<b>Maschinelles Lernen - Auswahl des Modells</b>	<b>23</b>
<b>8</b>	<b>Optimierung der Hyperparameter</b>	<b>26</b>

# 1 Einführung

In der größten bisher durchgeführten Studie zu Klimaangst von jungen Menschen behaupten 45% der Befragten, dass ihre Gefühle bezüglich des Klimawandels ihr tägliches Leben negativ beeinflussen. Ohne jede Zweifel stellt der Klimawandel uns und die uns folgenden Generationen vor eine nicht zu unterschätzende Herausforderung. Angefangen mit der Tatsache, dass die alleinige Diskussion darüber nicht selten zu einer Spaltung und Polarisierung der Gesellschaft führt. Folglich leitet die hitzige und emotionale Debatte dazu, dass die gegensätzlichen Lager sich immer weiter voneinander entfernen und somit jegliche Grundlage für eine zielführende Diskussion entreißen.

Auf der einen Seite werden die Befürchtungen der anderen für übertrieben, unwichtig und paranoid gehalten. Wissenschaftliche Unsicherheiten werden verwendet, um gesamte Ergebnisse von Studien als unzuverlässig einzustufen. Modelle werden in der Wissenschaft oft vereinfacht, denn die Isolation und Fokussierung auf bestimmte Aspekte kann helfen, um ein besseres Verständnis von Phänomenen in der Natur zu erlangen. Auf Grund von dieser Vereinfachung werden die Klimamodelle als zu ausdruckslos betitelt, um die Komplexität des Klimas von unserem Planeten widerzuspiegeln. Dementsprechend seien die Schlussfolgerungen aus den Studien unzutreffend. Investitionen mehrerer Milliardenbeträge seien nicht gerechtfertigt und politische Vorgaben schaden dem eigenem Land mehr, als dass sie dem Planeten helfen würden.

Am gegenüberliegenden Ufer wird gemahnt, die Ernsthaftigkeit der Situation nicht zu unterschätzen. Gewarnt wird, dass die Konsequenzen des Klimawandels irreversibel seien, weswegen Treibhausgase unverzüglich auf ein Minimum reduziert werden sollten. Um Folgen wie das Abschmelzen der Eisschilde und Gletscher, das Aussterben verschiedenster Tierarten und der Anstieg des Meeresspiegels zu verhindern, spielen erneuerbare Energien eine entscheidende Rolle. Im Gegensatz zu fossilen Energieträgern erzeugen die Erneuerbaren keine oder nur kaum Treibhausgasemissionen. Bis 2030 sollen die regenerativen Energien 80% des Strombedarfs Deutschlands decken. Da die Möglichkeiten der Energieerzeugung in Deutschland durch Wasserkraft und Biomasseverbrennung schon

heute nahezu ausgeschöpft sind, bilden Solar- und Windenergie einen wichtigen Grundpfeiler um die Ausbauziele zu erreichen.

Ebenso komplex wie die Klimamodelle, die die Verstrickungen verschiedener Phänomene in unserer Natur berücksichtigen sollen, ist allerdings die Transformation unseres Stromnetzes. In einem Netz, welches dafür ausgelegt wurde, dass wenige größere Kraftwerke Strom einspeisen, werden künftig immer mehr kleinere, dezentrale Kraftwerke mitwirken. Als Folge kommen diverse Herausforderungen auf uns zu. Unter anderem verträgt nicht jedes elektronische Bauteil in einem Niederspannungsnetz Rücklaufstrom. (Quelle?) Allerdings könnte es genau zu einem solchen Rücklaufstrom kommen, wenn in dem Niederspannungsnetz mehr Strom erzeugt als verbraucht wird. Des Weiteren reagiert ein Stromnetz äußerst empfindlich auf Spannungsschwankungen. Auf Grund dessen müssen Netzbetreiber darauf achten, dass genauso viel Strom verbraucht wie erzeugt wird. Solar und Windenergie zählen zu den fluktuierenden Energieerzeugern, ergo ist die Stromproduktion nur sehr begrenzt regulierbar und somit nicht an die aktuelle Marktnachfrage anpassbar.

Die Relevanz der Abschlussarbeit basiert auf der Annahme, dass eine genauere Prognose über die erzeugte Strommenge helfen würde das Stromnetz zu stabilisieren und Netzschwankungen, ergo das Risiko eines Brown- oder sogar Black-Outs zu minimieren. Anhand der neu gewonnenen Information könnten kurzfristige Stromimporte beziehungsweise -exporte besser reguliert werden. Ebenso wäre es denkbar, dass man für die Industrie und/ oder Endverbraucher mehr Anreize schafft ihren Stromverbrauch zu einem gewissen Grad an die Verfügbarkeit des Stroms anzupassen, wobei die Information über die Verfügbarkeit von Strom gleichfalls hilfreich wäre.

## **2 Stand der Technik**

### **2.1 Strombedarf in Deutschland**

### **2.2 Schwankungen im Stromnetz**

Dementsprechend ist es für uns unverzichtbar, die Wichtigkeit einer stabilen Stromerzeugung richtig einzuschätzen und anhand dessen Maßnahmen zu ergreifen, um Spannungsschwankungen im Netz so gut wie möglich zu reduzieren.

### **2.3 Maschinelles Lernen**

### 3 Eigene Fragestellung und methodisches Vorgehen

Um die zukünftigen Herausforderungen der Energieversorgung zu bewältigen, befasst sich diese Arbeit damit den fluktuierenden Stromerzeuger, die Photovoltaikanlage, so gut wie möglich in unser bestehendes Stromnetz zu integrieren. Die zentrale Fragestellung lautet hierbei, wie man präzise den erzeugten Solarstrom prognostizieren kann. Um dieses Ziel zu erreichen, sollen zuerst entscheidende Parameter ermittelt werden, die die Stromerzeugung einer Solaranlage beeinflussen. Allerdings liegt der Fokus ebenfalls darauf, dass die Berechnung der Prognose für beliebige Photovoltaikanlagen anwendbar ist, indem nur wenige spezifische Informationen über die Anlage in die Berechnung einfließen. Selbstverständlich spielen verschiedenste Eigenschaften der Solaranlage eine entscheidende Rolle, jedoch werden diese im Datenmodell nicht berücksichtigt. Zunehmende Rechenkapazitäten und kostengünstigere Speichermöglichkeiten ermöglichen es, dass für jede einzelne Solaranlage ein eigenes Datenmodell angelegt wird. Somit können die Gegebenheiten der Photovoltaikanlage, wie Quantität und Qualität der Solarpanele, vernachlässigt werden. Durch die Trainingsdaten ist das Datenmodell selbstständig in der Lage die Leistungsfähigkeit der Solaranlage zu beurteilen. Ein weiterer Vorteil ist, dass dadurch schwer zu beschaffende Datensätze nicht weiter benötigt werden. Stattdessen wird das Modell fast ausschließlich von Wetterdaten trainiert, welche von verschiedensten Institutionen flächenmäßig und umfangreich aufgezeichnet werden. Die für das Trainieren des maschinellen Lernen Modells benötigten Wetterdaten werden von der Website <https://www.visualcrossing.com> extrahiert. Die Website bietet einen kostenfreien Zugang zu detaillierten historischen Wetterdaten, bis zu 50 Jahren vor heute.

#### HIER: QUELLE SOLARDATEN

Durch die Literaturrecherche sind bereits die relevanten Faktoren eingegrenzt wurden, allerdings ist eine exakte Analyse der Daten unumgänglich. Hierbei soll vor allem beachtet werden, ob die Aufnahme des Merkmals einen solch starken Einfluss auf die Stromerzeugung hat, sodass die zunehmende Komplexität des Modells gerechtfertigt ist. Herausfordernd ist dabei, ob die Informationen in man-



chen Merkmalen nicht bereits in anderen Merkmalen enthalten sind. Schließlich korrelieren einige Wetterdaten sehr stark miteinander. Ebenso gilt es zu überprüfen, ob sich die ausgewählten Merkmale auf unterschiedliche Solaranlagen auf die gleiche Art und Weise auswirken. Um dies zu überprüfen, sollen mehrere Solaranlagen an verschiedenen Standorten ausgesucht und getestet werden.

Sofern es gelingt, sämtliche sich variierende Parameter herauszufinden, die die Solarproduktion beeinträchtigen, ist maschinelles Lernen eine vielversprechende Technologie um die Stromerzeugung zu prognostizieren. Insbesondere ist zu erwarten, dass sich das Spektrum der Trainingsdaten und das Spektrum während der Produktion (Inbetriebnahme) sich nicht groß voneinander unterscheiden werden.

Eine Unvollkommenheit des Datenmodells ist jedoch die Alterung der Solaranlage, welche dazu führt, dass die Leistungsfähigkeit über die Lebenszeit sich reduziert. Wie stark die Alterung jedoch die Prognose beeinträchtigt, lässt sich über den Zeitraum dieser Arbeit von vier Monaten nur schwerlich beurteilen. Mögliche Konsequenzen wären ältere Daten kontinuierlich auszusortieren und mit das Modell mit den Neusten zu aktualisieren. Es ist davon auszugehen, dass der Alterungsprozess sich nur langsam in den Datensätzen bemerkbar machen wird, weshalb er die Ergebnisse über die kurze Zeitspanne kaum verfälschen dürfte.

## 4 Wichtige Faktoren bei der Stromerzeugung durch Solarenergie

Bevor der Stromertrag einer Photovoltaikanlage mit Hilfe von künstlicher Intelligenz berechnet werden soll, ist es von immenser Bedeutung die maßgeblichen Faktoren herauszufinden. Wenn ein Modell eingelernt werden soll, können zu viele Faktoren zum *Fluch der Dimensionen* führen. Dieser besagt, dass zu viele Merkmale dazu verleiten, dass Muster und Strukturen sich schwerer erkennen lassen. Die Datenpunkte sind durch die Größe des mehrdimensionalen Raums weiter voneinander entfernt, wodurch die Interpretierbarkeit komplexer wird. Dementsprechend sind die Eingabedaten behutsam auszuwählen.

### 4.1 Wetter-unabhängige Faktoren

In Bezug auf die Rahmenparameter der Solaranlage ist die reine Größe selbstverständlich ein maßgeblicher Faktor. Hinzu kommt, dass sich dieses Merkmal für jede individuelle stark unterscheiden kann. Die Dimensionierung der Solaranlage hängt schließlich ebenfalls von verschiedenen Faktoren ab, darunter die verfügbare Fläche am Standort, dem Energiebedarf und dem Verwendungszweck.

#### 4.1.1 Schatten

Durch die Aggregation von Metadaten der Solaranlagen könnte man die zuvor genannten Faktoren ebenfalls in das Datenmodell einfließen lassen. Die Komplexität des Modells würde erheblich zunehmen, jedoch wäre es somit auf verschiedene Solaranlagen verallgemeinerbar. Zwei Faktoren überdehnen jedoch nicht nur die Möglichkeiten der Anwendungen von maschinellem Lernen - oder würden die Vorhersagen des Modells zumindest signifikant beeinträchtigen. Des Weiteren stellen sie teilweise eine große Herausforderung beim Schritt der Datenerfassung dar. Erster Faktor ist die Umgebung der Solaranlage, die sich folglich nur auf jene Solaranlage auswirken. Umliegende höhere Gebäude, Hügel und Bäume können Schatten auf die Solarmodule werfen, wodurch die Sonnenstrahlung blockiert und die Stromproduktion reduziert wird. Gesondert anspruchsvoll wird es dadurch, dass der geworfene Schatten von der Elevation der Sonne abhängig

ist. Die Elevation der Sonne wiederum ist von der Jahreszeit abhängig. Die Wahrscheinlichkeit, dass die Solarpanele durch umliegende Strukturen verdeckt wird, ist somit im Winter höher.

#### *4.1.2 Orientierung*

Der zweite Faktor ist die Orientierung der Solarmodule, womit im Fachjargon der Architektur die Ausrichtung eines Baukörpers nach den Himmelsrichtung gemeint ist. Sofern die Module statisch befestigt sind, sollten die Module Richtung Süden ausgerichtet sein, um den höchsten Stromertrag zu erzielen. Allerdings lassen sich die örtlichen Gegebenheiten bei der Installation der Solarpanele nicht ignorieren. Vor allem Solaranlagen, die für den Eigenbedarf installiert wurden, sind häufig auf Dächern befestigt. Allein aus Sicherheitsgründen werden die Solarmodule in aller Regel flach auf den Dachziegeln des Schrägdachs montiert, da ansonsten starker Wind die Module aus ihrer Befestigung reißen könnte. Folglich gibt die Ausrichtung des Gebäudes in vielen Fällen die Ausrichtung der Solarmodule ohne großen Spielraum vor. Konsequenz dessen ist, dass die Leistungsfähigkeit einer Solaranlage so vielfältig sein kann, wie die Bedachung von Häusern individuell ist.

Die Ausrichtung der Solarmodule hat nicht nur auf die gesamte erzeugte Strommenge Auswirkungen, des Weiteren führt sie dazu, dass Solaranlagen mit vergleichbarer Gesamtleistung zu unterschiedlichen Uhrzeiten kontrastiert Strom produzieren. Für die Netzstabilität ist es jedoch zwingend notwendig, dass kontinuierlich für eine gleichbleibende Spannung gesorgt wird. Folglich interessieren wir uns nicht nur für die kumulativ erzeugte Strommenge einer Photovoltaikanlage, weitaus spannender sind die Echtzeit-Vorhersagen.

Sowohl die Ausrichtung der Solarmodule als auch die Umgebung der Anlage soll in das Modell einfließen, indem Uhr- und Jahreszeit zu der entsprechenden Strommenge festgehalten werden. Die Logik dahinter ist mit der Annahme verbunden, dass sich die beiden Faktoren durch Uhr- und Jahreszeit repräsentieren lassen, weil die Konstellationen wiederkehrend sind. Ein Haus oder ein Baum, dass zwischen 11:14 und 11:46 Uhr Schatten auf die Solaranlage wirft, wird mit

hoher Wahrscheinlichkeit die Stromproduktion der Solaranlage am nächsten Tag auf die gleiche Weise beeinträchtigen. Das Ziel der Forschung ist, dass das Datenmodell diesen Zusammenhang erkennt und eine niedrigere Stromproduktion prognostiziert als am Nachmittag, wenn sonst die gleichen Bedingungen vorliegen.

Die Jahreszeit bündelt mehrere Faktoren und nimmt somit Komplexität aus dem Modell, ohne dabei entscheidende Rahmenparameter zu vernachlässigen. Wie bereits erwähnt können sich die Umgebungsfaktoren über die Jahreszeiten hinweg verändern, zum anderen wandert die Sonne in einem anderen Winkel über die Solaranlage. Der Einstrahlungswinkel und die Umgebung sind entscheidend für die Stromproduktion und werden durch die Jahreszeit repräsentiert.

Die Kalenderwoche scheint ein guter Kompromiss zu sein, um die verschiedenen Faktoren abzubilden. Der  $n$ -te Tag des Jahres würde den Merkmalsraum des Modells deutlich vergrößern. Da die Dimension des Merkmals 1 bis 366 statt 1 bis 53 wäre, ist die Wahrscheinlichkeit, dass sich die einzelnen Datenpunkte in der Größe des Raums verlieren, deutlich höher. Die Elevation der Sonne unterliegt zwar einem ständigen Wandel, allerdings ist es zudem äußerlich fraglich, ob die minimalen Differenzen zwischen den einzelnen Tagen für die Prognose der Stromerzeugung einer Photovoltaikanlage überhaupt bemerkbar sind.

## **4.2 Nachgeführte Photovoltaikanlagen**

Sogenannte nachgeführte Photovoltaikanlagen folgen selbstständig und automatisiert dem Sonnenstand, wodurch die Solarstromproduktion gegenüber stationären Anlagen verbessert wird. Optimalerweise trifft das Sonnenlicht fortwährend senkrecht auf die Solarmodule. Um dies zu bewerkstelligen, wird der Neigungswinkel und/ oder die Ausrichtung nach der Himmelsrichtung an den aktuellen Sonnenstand angepasst.

Die im letzten Unterkapitel genannten Faktoren werden aus dem Datenmodell mit der Begründung ausgeschlossen, weil für jede Solaranlage ein eigenes Modell angelegt wird und somit bei gleichen Wetterbedingungen dieselben Ergebnisse erzielt werden. Sowohl die Leistungsfähigkeit, der Wirkungsgrad des

Wechselrichters als auch die Umgebungsfaktoren sind nahezu feste Rahmenparameter. Bei nachgeführten Photovoltaikanlagen haben wir nun den Fall, dass sich ein wichtiger Faktor, die Position des Solarmoduls in Bezug auf die Sonne, stets verändert, ohne dass dies in den Eingabedaten des Modells bemerkbar ist. Um die Konsequenzen für unser Vorhersagemodell zu beurteilen, müssen wir zwischen zwei verschiedenen Methoden, um eine Photovoltaikanlage nachzuführen, unterscheiden. Zum einen gibt es die astronomische und die sensorische Steuerung von PV-Anlagen.

#### *4.2.1 Astronomisch nachgeführte Photovoltaikanlagen*

Bei der astronomischen Steuerung werden die Solarmodule kontinuierlich zur Sonne hin ausgerichtet, unabhängig von der Wolkendecke. In diesem Szenario ist die Ausrichtung der Solarmodule zwar dynamisch, allerdings wird mit Hilfe dieser Methode die Ausbeute der Stromproduktion stets auf die gleiche Art und Weise verbessert. Insofern macht es für das maschinelle Lernen keinen Unterschied, ob die Solaranlage stets zur Sonne gewandt oder statisch montiert ist. Den Sonderfall, dass die Getriebemotoren beschädigt sind und ausfallen, sei an dieser Stelle außen vorgelassen.

#### *4.2.2 Sensorisch nachgeführte Photovoltaikanlagen*

Spannender wird es bei der aufwendigeren Technologie, die einen lokal installierten Sensor die optimale Ausrichtung der Solarpanele ermitteln lässt. Der hellste Punkt am Himmel wird durch die Sensorsteuerung wahrgenommen und dementsprechend werden die Sonnenkollektoren ausgerichtet. Der hellste Punkt am Himmel kann sich jedoch sehr schnell ändern, da er von der aktuellen Wolkendecke abhängt. Vor allem bei einer durchwachsenen Wolkendecke lässt sich nur schwer ermitteln, ob die Solarpanele im Moment von einer Wolke bedeckt werden.

HIER: WOLKENKAMERA ERMÖGLICHT DIES, [WEBSITE VERLINKEN](#)

Folglich wird die Ausrichtung der Sonnenkollektoren durch den Sensor kontinuierlich an die aktuellen Gegebenheiten angepasst. Die exakte Wolkensituation

unterliegt einem stetiger Veränderung und wird keineswegs durch die Eingabedaten der Realität entsprechend repräsentiert, wodurch Ungenauigkeiten bei der Prognose entstehen können.

Die gleiche Problematik besteht auch bei herkömmlichen Solaranlagen, deren Module nicht sensorgesteuert ausgerichtet werden. Insbesondere werden die für dieses Projekt zur Verfügung stehenden Wetterdaten nicht in dem Intervall aktualisiert, indem sich die Wetterlage in der Wirklichkeit verändert. Da das Ziel dieser Arbeit ist, die gemittelte, erzeugte Strommenge stündlich vorauszusagen, soll uns die ständig schwankende Leistungsabgabe einer Solaranlage nicht fortführend stören.

Inwiefern die Prognose bei durch einen Sensor nachgeführten Photovoltaikanlage verschlechtert wird, gilt es zu untersuchen. Da vor allem die sensorgesteuerte Variante der nachgeführten Photovoltaikanlagen auch mehrere Nachteile, wie höhere Installations- und Wartungskosten mit sich bringt, wird der Marktanteil solcher Anlagen auf eher gering eingeschätzt. Folglich werden die Auswirkungen auf die Prognose nicht in dieser Arbeit untersucht.

### **4.3 Wetter-abhängige Faktoren**

Verschiedene Wolkentypen wirken sich unterschiedlich auf die Sonneneinstrahlung aus. Zudem gehören Wolken zu den unbeständigen Faktoren, die sich sprunghaft auf die Stromerzeugung auswirken. Selbst wenn exakte, detailreiche Daten über die Bewölkung für die Forschung dieser Arbeit nicht vorliegen, soll der Effekt der unterschiedlichen Wolkentypen im folgenden kurz erläutert werden.

#### *4.3.1 Wolkenarten*

Stratuswolken sind flache, graue Wolken, die den Himmel oft bedecken. Sie bestehen aus Wassertröpfchen und liegen in niedriger Höhe. Stratuswolken blockieren die Sonneneinstrahlung und reduzieren die Helligkeit des Tageslichts erheblich. Sie haben eine kühlende Wirkung, da sie einen großen Teil der Sonnenenergie reflektieren.

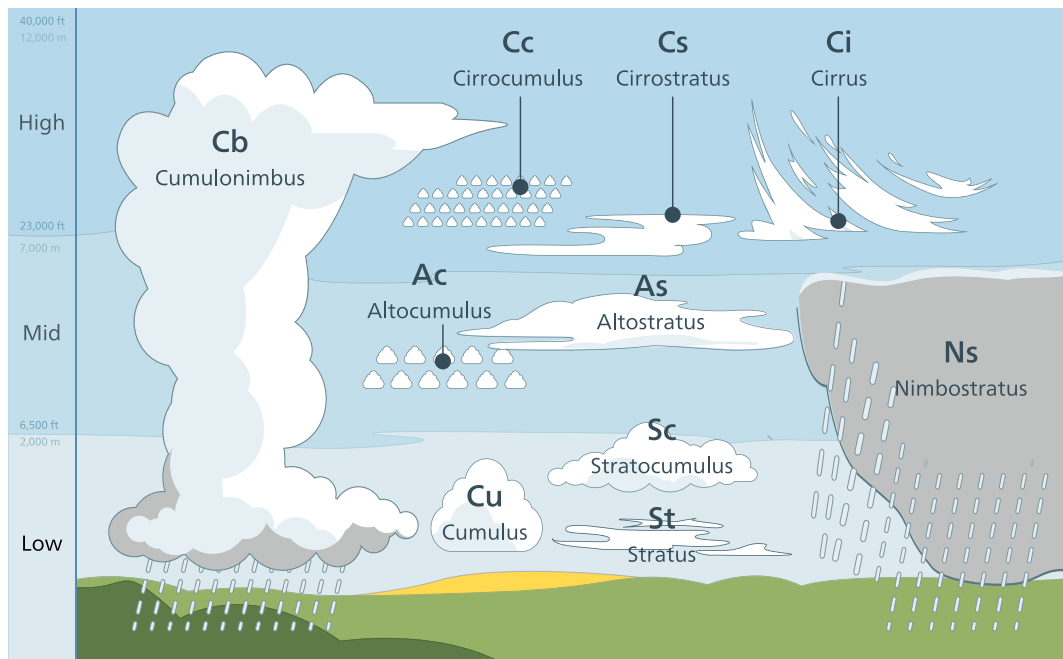


Abbildung 1: Wolkentypen

Cumuluswolken sind große, weiße, flauschige Wolken mit einer flachen Basis und einer kuppelförmigen Oberseite. Sie treten oft an sonnigen Tagen auf. Cumuluswolken können die Sonneneinstrahlung beeinflussen, indem sie sie teilweise reflektieren und teilweise absorbieren. Dadurch entstehen Schatten und Sonnenflecken auf der Erdoberfläche.

Cirruswolken sind dünne, faserige Wolken, die in großen Höhen schweben. Sie bestehen aus Eiskristallen und erscheinen oft als Federwolken oder Schleierwolken. Cirruswolken lassen viel Sonnenlicht durch und haben daher eine geringere Auswirkung auf die Sonneneinstrahlung. Sie können jedoch einen Schleier vor der Sonne bilden und das Licht diffus erscheinen lassen.

Nimbostratuswolken sind dichte, graue Wolken, die mit starkem Niederschlag verbunden sind. Sie erstrecken sich über große Gebiete und sind oft mit anhaltendem Regen oder Schneefall verbunden. Nimbostratuswolken blockieren die Sonneneinstrahlung weitgehend und führen zu trüben, düsteren Bedingungen.

#### 4.3.2 Relative Luftfeuchtigkeit und Luftdruck

Im Allgemeinen lässt sich sagen, dass die Teilchen (Wassertröpfchen, Eiskristalle, Staub, Pollen, Meeressalze und Schadstoffe), aus denen die Wolken be-

stehen, die Sonnenstrahlen reflektieren oder absorbieren. Auf die gleiche Weise können Wasser- und Luftpartikel in der unteren Troposphäre die Strahlung beeinflussen. Folglich ist die gemessene Luftfeuchtigkeit und der Luftdruck ein weiteres Kennzeichen dafür, wie viele Teilchen sich in der Troposphäre befinden. Umso höher die beiden Werte sind, desto größer ist die Wahrscheinlichkeit, dass die Sonneneinstrahlung reflektiert oder absorbiert wird, wodurch wir die Erwartungen an den Stromertrag senken müssen.

#### 4.3.3 Temperatur

Ein weit verbreiteter Glaube ist, dass die Stromproduktion durch Solaranlagen im Hochsommer am höchsten ist. In aller Regel ist dies jedoch nicht der Fall, da die Temperatur eine entscheidende Rolle spielt. Die hohen Temperaturen im Sommer beeinträchtigen den Wirkungsgrad der Solarzellen, welche die Schlüsselkomponente eines Photovoltaiksystems bilden. Die meisten Hersteller geben einen Temperaturkoeffizienten an, der spezifiziert inwiefern sich der Wirkungsgrad mit steigenden Temperaturen verändert. Gewöhnlich erhöht sich der Widerstand im Stromkreis der Solarzelle mit den höheren Temperaturen, wodurch die Gesamtleistung der Anlage zurückgeht. Folgende Temperaturkoeffizienten sind aus dem Datenblatt der Solarmodule *White* von dem renommierten, deutschen Solarmodulhersteller *Meyer Burger* entnommen:

Temperaturkoeffizient $I_{SC}$	$\alpha$	$[\%/K]$	+0,033
Temperaturkoeffizient $V_{OC}$	$\beta$	$[\%/K]$	−0,234
Temperaturkoeffizient $P_{MPP}$	$\gamma$	$[\%/K]$	−0,259

Tabelle 1: Temperaturkoeffizienten Solarmodule Meyer Burger White

In Tabelle 1 ist ersichtlich, dass zwar der Kurzschlussstrom mit höherer Temperatur zunimmt, allerdings verringert sich die Leistung der Anlage. Dies ist am negativen Temperaturkoeffizienten  $P_{MPP}$  ersichtlich. Die Tatsache, dass auch die Wetter-abhängigen Faktoren sich unterschiedlich auf die Stromerzeugung einzelner Solaranlagen auswirken, bestärkt die Notwendigkeit für jede Solaranlage ein



eigenes Modell anzulegen.

Des Weiteren kommt hinzu, dass bei manchen Solaranlagen ein Kühlmanagementsystem verbaut ist, das die Effizienz der Solarmodule steigert. Ebenso ist die Art der Befestigung in Bezug auf die Temperaturentwicklung von Interesse. So herrscht ein stärkerer Luftzug, wenn unter den Solarmodulen ein Freiraum ist. Durch die spürbaren Auswirkungen der heißen Temperaturen, müssten bei einem allgemeinen Modell zusätzlich zu der sich variierender Temperatur auch die Leistung des aktiven beziehungsweise passiven Kühlsystems berücksichtigt werden, wodurch selbstverständlich die Komplexität weiter in die Höhe getrieben werden würde. Auch an dieser Stelle sei erwähnt, dass die Kühlleistung des Systems und die Art der Montage in aller Regel statisch ist, weswegen wir sie getrost nicht in den Eingabedaten unseres Datenmodells berücksichtigen müssen.

#### *4.3.4 Wind*

Wind kann als eine Art natürlicher Ventilator dienen. Die entstehende Luftbewegung um die Solarmodule trägt dazu dabei, dass stehende Hitze auf der Oberfläche der Panele abgeführt werden kann. Dies dient der Aufrechterhaltung niedriger Betriebstemperaturen und fördert somit die Effizienz der Anlage. Selbstverständlich hängt auch hier der Einfluss der Winde von den örtlichen Gegebenheiten ab. Luftschneisen können diesen Effekt verstärken, während umliegende Hindernisse den Luftstrom genauso blockieren können.

#### *4.3.5 Sonneneinstrahlung*

Die Sonne emittiert Energie in sämtliche Richtungen über den gesamten elektromagnetischen Strahlungsbereich. Ungefähr 20 Kilometer über der Erdoberfläche treffen im Mittel  $S = 1367 \text{ W/M}$ . Messungen im Weltraum haben gezeigt, dass dieser Wert nur geringfügig um vage 0,1% über die letzten Jahrzehnte geschwankt ist, weswegen er als die Solarkonstante betitelt wird.

In Abbildung 2 ist eine Karte von Deutschland zu sehen. Dargestellt wird die Monatssumme der Globalstrahlung. Deutlich zu erkennen ist, dass im Süden die Globalstrahlung im Mittel höher ist als im Norden. Folglich kommt die Sonnen-

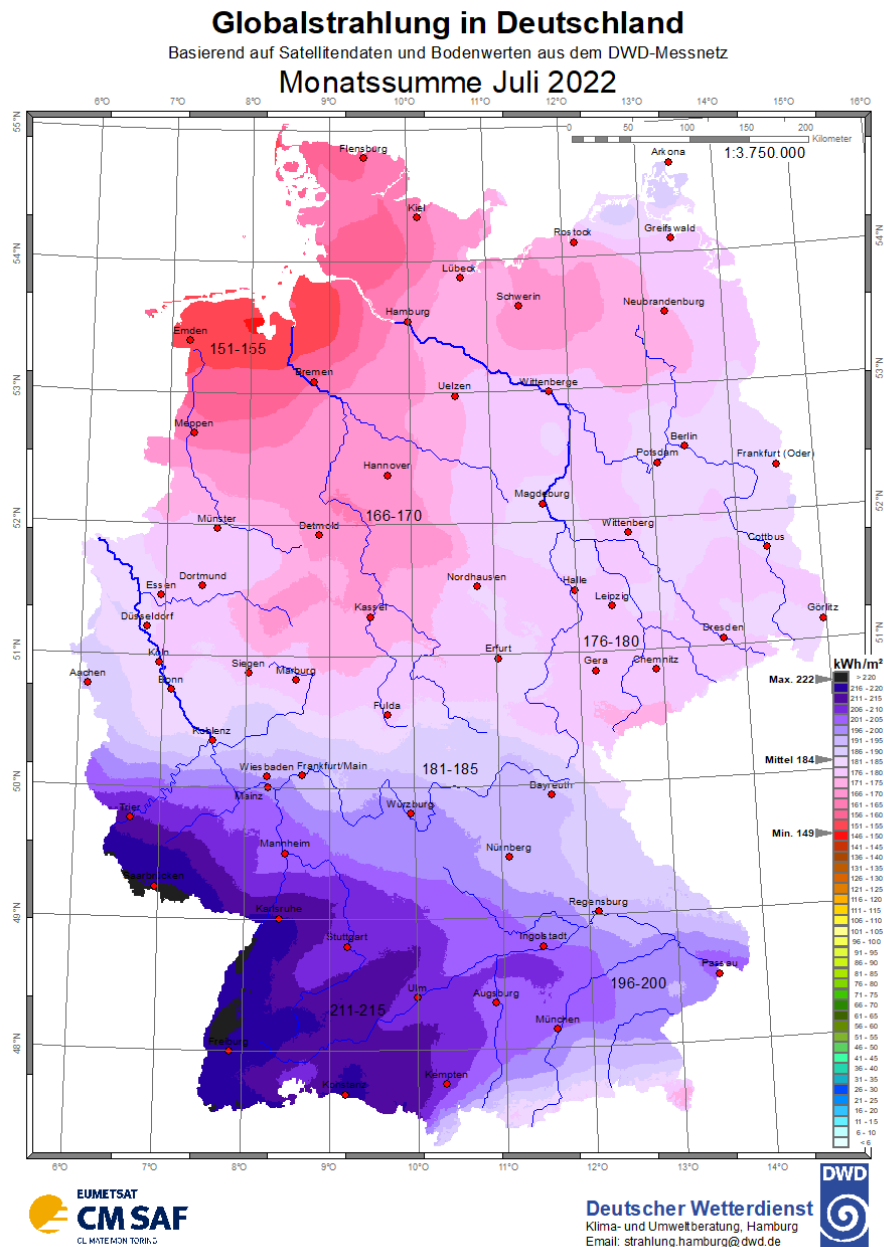


Abbildung 2: Sonneneinstrahlung Deutschland, Juli 2022

strahlung keineswegs gleichermaßen auf der Erdoberfläche an. Viele Faktoren tragen dazu bei, dass die Sonnenstrahlen unterschiedlich stark an verschiedenen Orten der Erdoberfläche auftreffen. Die Kugelform unseres Planeten ist der Grund, dass je höher der Breitengrad, desto flacher treffen die Sonnenstrahlen die Oberfläche der Erde, wodurch sich diese Strahlen auf eine größere Fläche verteilen. Auf die gleiche Weise wirkt sich die Topografie der Erde aus, wodurch es zu stärkeren, lokalen Unterschieden der Bestrahlung kommen kann.

Zum flacheren Einstrahlungswinkel in den höheren Breiten kommt hinzu, dass die Sonnenstrahlen eine größere Strecke zurücklegen müssen. Insbesondere auf dem letzten Abschnitt ihrer Reise, nämlich der Atmosphäre, kommen immer mehr Hindernisse wie Luftpartikel oder Wassertröpfchen hinzu, die die Strahlen reflektieren oder absorbieren können. Dass die Auswirkungen der Teilchen nicht zu unterschätzen sei, ist allein an der Temperaturabnahme bei zunehmender Höhenlage erkenntlich. Da die Energie der Sonnenstrahlen mit steigender Höhe von immer weniger Teilchen absorbiert werden kann, nimmt die Temperatur im Mittel  $6,5K/1Kilometer$  ab, bis sie Zahlenwerte von unter  $-50^{\circ}C$  an der Tropopause erreicht.

Die auf der Erde gemessene Globalstrahlung setzt sich aus der Diffusstrahlung und Direktstrahlung zusammen. Unter Diffusstrahlung versteht man jene Strahlung, die auf ihrem Weg von der Sonne zur Erde an anderen Atomen reflektiert und dadurch gestreut wurde. Direktstrahlung hingegen wurde nicht abgelenkt und ist dadurch intensiver und gebündelt. Während die Globalstrahlung schon seit geraumer Zeit protokolliert wird, vermisst der *Deutsche Wetterdienst* erst seit wenigen Jahren auf die horizontale Ebene bezogene Diffusstrahlung. Aus der Differenz der beiden wird die Direktstrahlung berechnet.

Die solare Stromerzeugung beruht auf der reichlich vorhandenen Energie der Sonne, die immense Mengen an Sonnenenergie auf die Erdoberfläche abstrahlt. Das Verständnis der verschiedenen Faktoren, die sich auf die Solarstromerzeugung auswirken, ist entscheidend für die Optimierung der Effizienz und Leistung von Solarenergiesystemen. Unter diesen Faktoren spielt die Sonneneinstrahlung eine zentrale Rolle. In diesem Kapitel befassen wir uns mit der komplizierten Be-

ziehung zwischen Sonneneinstrahlung und Solarstromerzeugung und untersuchen ihre Eigenschaften, Schwankungen und die Auswirkungen auf die Gesamtleistung von Solarenergiesystemen.

#### 5.1 Die Natur der Sonnenstrahlung:

Unter Sonnenstrahlung versteht man die von der Sonne ausgestrahlte elektromagnetische Energie, die durch den Weltraum wandert und die Erdatmosphäre und -oberfläche erreicht. Diese Strahlung umfasst ein Spektrum von Wellenlängen, darunter ultraviolettes (UV), sichtbares Licht und Infrarotstrahlung (IR). Die Menge und Intensität der Sonnenstrahlung, die an einem bestimmten Ort empfangen wird, wird von verschiedenen Faktoren wie Tageszeit, Jahreszeit, Breitengrad und Wetterbedingungen beeinflusst.

#### 5.2 Solare Bestrahlungsstärke und Sonneneinstrahlung:

Zwei wichtige Begriffe zur Quantifizierung der Sonnenstrahlung sind die solare Bestrahlungsstärke und die Sonneneinstrahlung. Die solare Bestrahlungsstärke stellt die von der Sonne empfangene Leistung pro Flächeneinheit dar und wird üblicherweise in Watt pro Quadratmeter ( $\text{W/m}^2$ ) gemessen. Die Sonneneinstrahlung hingegen bezieht sich auf die Gesamtmenge der über einen bestimmten Zeitraum empfangenen Sonnenenergie und wird normalerweise in Kilowattstunden pro Quadratmeter ( $\text{kWh/m}^2$ ) oder Megajoule pro Quadratmeter ( $\text{MJ/m}^2$ ) angegeben.

Die Erdatmosphäre beeinflusst die Sonnenstrahlung, die die Erdoberfläche erreicht. Sie streut und absorbiert einen Teil der Strahlung, was zu Schwankungen in der Intensität und im Spektrum der empfangenen Sonnenenergie führt.

#### 5.3 Schwankungen der Sonneneinstrahlung:

Die Sonneneinstrahlung unterliegt zeitlichen und räumlichen Schwankungen, die die solare Stromerzeugung beeinflussen. Zeitliche Schwankungen treten auf verschiedenen Zeitskalen auf, z. B. in Tages-, Saison- und Jahreszyklen.

Die täglichen Schwankungen der Sonnenstrahlung sind in erster Linie auf die Erdrotation und den Winkel zurückzuführen, in dem die Sonnenstrahlen einen bestimmten Ort erreichen. Die Intensität der Sonnenstrahlung ist am höchsten,

wenn die Sonne im Zenit steht, also um die Mittagszeit, und nimmt am Morgen und Abend ab.

Die jahreszeitlichen Schwankungen ergeben sich aus der Neigung der Erdoberfläche, die dazu führt, dass der Einfallswinkel der Sonne im Laufe des Jahres variiert. Infolgedessen schwankt die Sonneneinstrahlung, wobei die Sonneneinstrahlung in den Sommermonaten intensiver und in den Wintermonaten schwächer ist.

Außerdem beeinflussen Faktoren wie Bewölkung, Luftverschmutzung und geografische Lage die räumlichen Schwankungen der Sonneneinstrahlung. Gebiete in Äquatornähe erhalten im Allgemeinen das ganze Jahr über eine höhere Sonneneinstrahlung als Regionen in höheren Breitengraden.

## **5 Zusammenhänge der Merkmale**

## **6 Datenvorverarbeitung**

Für die Forschung dieser Arbeit wurden ein paar Solaranlagen ausgewählt, um zu untersuchen, wie gut anhand von Wetterdaten sich die Solarstromproduktion prognostizieren lässt. Selbst bei den wenigen Solaranlagen, die für diese Forschung verwendet wurden, konnte festgestellt werden, dass die Zusammenhänge zwischen den einzelnen Wettermerkmalen und der erzeugten Strommenge sehr unterschiedlich sein kann.

### **6.1 Ausreißer**

## 7 Maschinelles Lernen - Auswahl des Modells

Die Konsequenz, dass die Zusammenhänge zwischen den Merkmalen und der Zielvariablen sehr verschieden sein können, ist es ein Modell auszuwählen, dass für seine Kontingenz gegenüber der Datenvorverarbeitung bekannt ist.

Ein Entscheidungsbaum *zu engl.: decision tree* hat eine Flussdiagramm ähnliche Baumstruktur, in der je nach ausgewählter Hyperparameter alle möglichen Ergebnisse, Eingabekosten und Nutzen dargestellt werden kann. Da das Modell sowohl für kategoriale als auch kontinuierliche Zielvariablen verwendet werden kann, eignet es sich für die Prognose verschiedener Solaranlagen.

Die Bedingungen werden innerhalb der Entscheidungsknoten aufgestellt. Der Entscheidungsbaum wird so lange durchgegangen, bis man an einem Endknoten angelangt ist. Die Endknoten eines Binärbaums werden als Blätter bezeichnet, sie bilden das Ergebnis für die jeweiligen Eingabedaten ab. Folglich müssen die Bedingungen des Binärbaum von oben nach unten durchgegangen werden, um zu einem Ergebnis zu gelangen. Ein Binärbaum hat die Eigenschaften, dass er maximal  $2^n$  Blätter besitzen kann, wobei  $n$  für die Höhe des Baums steht. Indes es nur so viele Ergebnisse wie Blätter geben kann, muss die Wertemenge der Zielvariablen diskretisiert werden.

Die diskretisierten Werte werden so ausgewählt, sodass der mittlere quadratische Fehler am geringsten ist. Für die Berechnung des mittleren quadratischen Fehler eines Blattes werden ausschließlich die Trainingswerte verwendet, die eben diesem Blatt zuvor zugeordnet wurden. Auf Grund des geringen Rechenaufwands genießt diese Straffunktion in vielen Bereichen der Informatik größerer Beliebtheit. Schließlich genügt durch die Art wie ein Computer Zahlen speichert eine anspruchslose Operation, explizit gesagt eine Bitverschiebung nach links, um das Quadrat einer Zahl auszurechnen. Somit ist diese Methode äußerst effizient, um die Mitte zwischen 2 oder mehreren Punkten zu finden. Den mittleren quadratischen Fehler als Straffunktion zu verwenden birgt allerdings den Nachteil, dass Ausreißer die Vorhersage sehr stark verfälschen können, weshalb diese idealerweise aus dem für das Training zuständigen Datensatz entfernt werden.



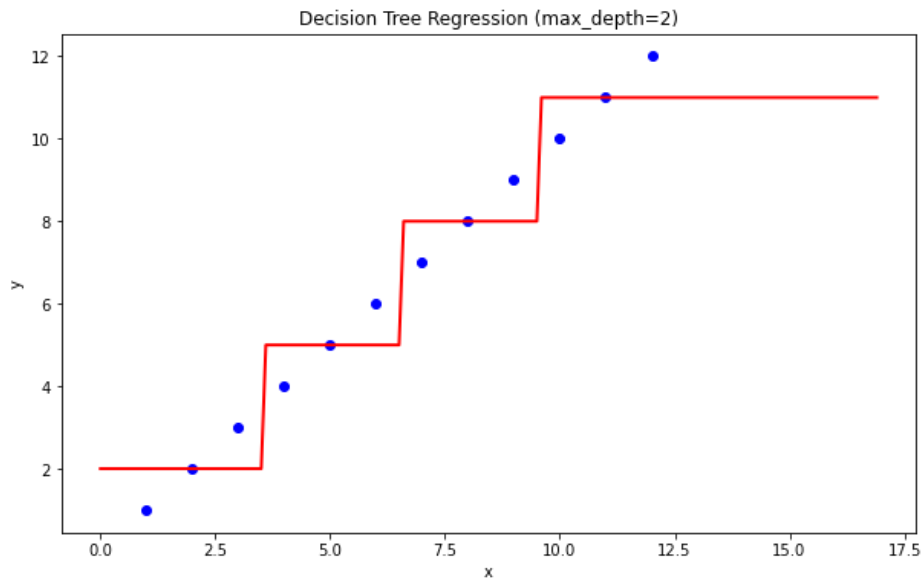


Abbildung 3: Einfacher Entscheidungsbaum mit einem Merkmal und der Tiefe 2

Wie so häufig kommen mit den Vorteilen eines Modells auch Nachteile einher. Zu einer der vielen Vorteile von Entscheidungsbäumen gehört die leicht verständliche Darstellung der Entscheidungsprozesse. Das Modell lässt sich als Flussdiagramm darstellen, wodurch sich die Vorhersagen des Modells gut nachvollziehen lassen. Dies ist bei der Fehlersuche und der Interpretierbarkeit von großem Nutzen.

Die Tatsache, dass nichtlineare Beziehungen gut erkannt werden können ist sowohl ein Nachteil als auch ein Vorteil. Viele der Wettermerkmale haben eine nicht-lineare Beziehung zu der erzeugten Strommenge einer Solaranlage. Vor allem sind die Beziehungen bei verschiedenen Solaranlagen unterschiedlich, wodurch die Vorverarbeitung der Daten sich als schwierig darstellt. Insofern ist es ein großer Vorteil, dass die Wetterdaten nicht modifiziert werden müssen. In Abbildung 3 ist jedoch ersichtlich, wie schwer sich ein Entscheidungsbaum mit linearen Beziehungen, wie beim Fall  $x = y$ , tun kann. Der Entscheidungsbaum kann den Zusammenhang  $x = y$  nicht nur sehr limitiert wiedergeben, des Weiteren wird bei gleicher Tiefe des Entscheidungsbaum der Fehler unabdingbar und maßlos größer, sobald Vorhersagen zu Daten getroffen werden soll, dessen Erwartungswert der Zielvariablen außerhalb des Wertebereichs des Trainingsdatensatz liegt. Das liegt daran, dass nach dem trainieren des Modells die Menge der möglichen Ausgangswerte bestimmt und statisch ist. Betrachte man nochmals Abbildung 3,

Decision Tree with Max Depth = 5

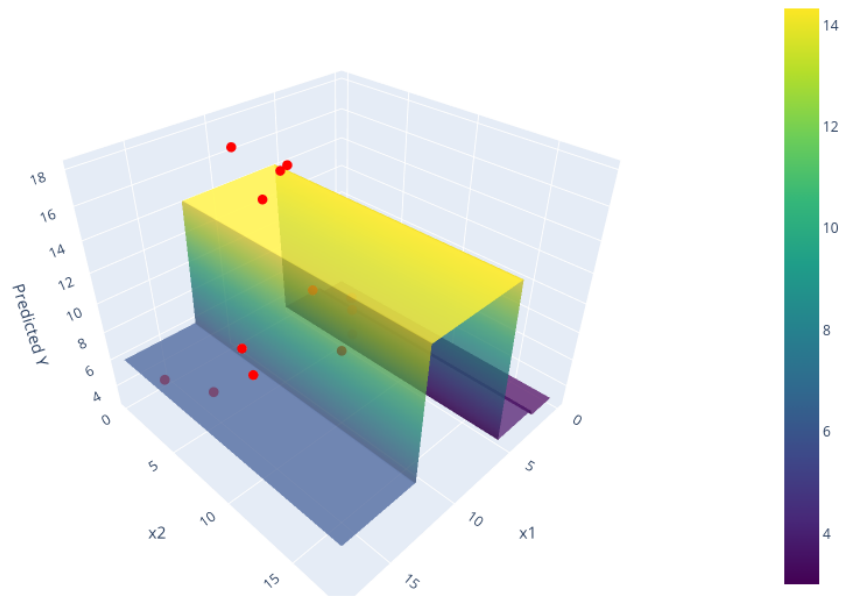


Abbildung 4: Einfacher Entscheidungsbaum mit 2 Merkmalen und der Tiefe 2

so wird ersichtlich, dass für  $x > 10$  stets  $y = 11$  prognostiziert wird. Da  $x = y$  ist, würde ein optimales Modell für  $x = 111$  auch  $y = 111$  vorhersagen. Wie bereits erwähnt würde unser Modell  $y = 11$  prognostizieren, wodurch wir den quadratischen Fehler  $100^2 = 10000$  erhalten.

Aus dieser Eigenschaft von Entscheidungsbäumen müssen zwei Schlussfolgerungen für die Prognose über die Stromerzeugung von Photovoltaikanlagen gezogen werden. Zum einem muss das Modell so lange trainiert werden, bis der Trainingsdatensatz alle möglichen Ausgangswerte der Zielvariablen beinhaltet. Da die Jahreszeit nicht nur eine erhebliche Rolle für die Vorhersage spielt, sondern den Maximalertrag eines Tages führend mitbestimmt, definiert sie folglich auch die Wertemenge der Zielvariablen. Somit sollte für jede Solaranlage mindestens ein Jahr lang Daten gesammelt werden. Gewiss kann das Modell bereits zuvor trainiert und für die Prognose verwendet werden, allerdings wird die Prognose weniger präzise, desto größer die Differenz zwischen den für das Training verwendeten Randwerten und den Test- beziehungsweise Produktionsdaten. Im Allgemeinen ist ein Entscheidungsbaum nicht gut darin Vorhersagen für Daten zu treffen die zuvor nicht im Raum des Trainingsdatensatzes waren.

Decision Tree with Max Depth = 5

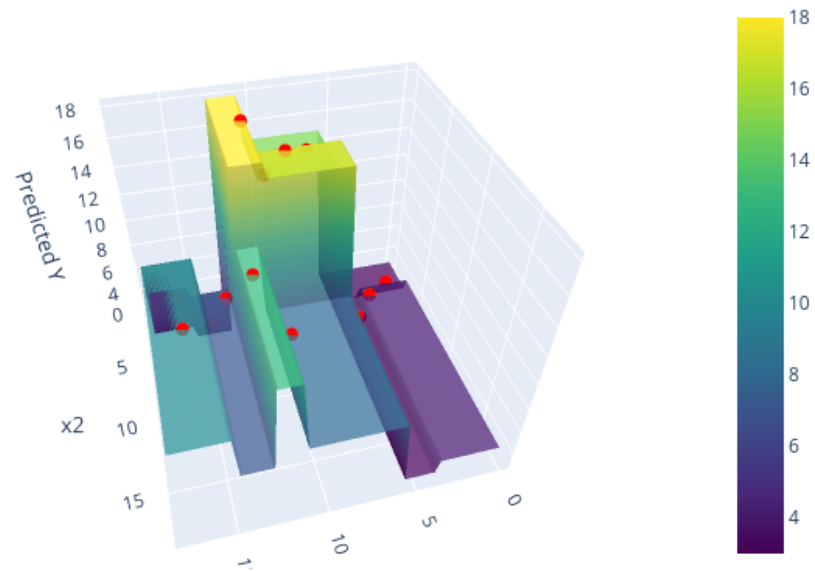


Abbildung 5: Einfacher Entscheidungsbaum mit 2 Merkmalen und der Tiefe 5

## 8 Optimierung der Hyperparameter