

# Die Bestimmung optimaler Kauf- und Verkaufspreise von Basiswerten zur Wahrung der täglichen Delta-Neutralität beim Handel von Aktienoptionen mit Hilfe verschiedener Machine Learning Methoden

Fabian Gehring, Sattelbogenstrasse 31, 5610 Wohlen  
Betreut durch Dr. Thomas Oskar Weinmann, ZHAW

## Inhaltsverzeichnis

<b>Management Summary</b>	<b>2</b>
<b>1 Einleitung</b>	<b>2</b>
1.1 Motivation . . . . .	2
1.2 Forschungsfrage . . . . .	4
<b>2 Daten</b>	<b>7</b>
2.1 Bezug und Umfang . . . . .	7
2.2 Aufbereitung . . . . .	9
<b>3 Infrastruktur und Tools</b>	<b>13</b>
3.1 Cloud Setup . . . . .	13
3.2 Verwendete Software . . . . .	16
<b>4 Analyse</b>	<b>17</b>
4.1 Einfache Optimierungen . . . . .	18
4.2 Nearest Neighbor Ansätze . . . . .	21
4.3 Neuronale Netzwerke . . . . .	26
<b>5 Fazit und Ausblick</b>	<b>34</b>

## Management Summary

In vorliegender Arbeit wird untersucht, ob mit Hilfe maschineller Lernalgorithmen Kauf- und Verkaufspreise von Aktien so prognostiziert werden können, dass der Ausgleich von aufgelaufenem Delta bei Optionspositionen mit höherem Payoff erfolgen kann als mit einfacheren Strategien. Es gilt dabei die Nebenbedingung, dass die Position zum Tagesende bezüglich Preisschwankungen abgesichert sein muss. Als Referenz dient dabei die Strategie, bei welcher untertags kein Kauf- und Verkauf von Aktien erfolgt, sondern der Ausgleich des Deltas komplett zum Tagesschlusskurs erfolgt. Als Datenbasis dienen die historischen Eröffnungs-, Tiefst-, Höchst- und Schlusskurse von rund 1'600 grossen kotierten Unternehmungen weltweit.

In einem ersten Ansatz werden die Kauf- und Verkaufsschranken als symmetrische Auslenkungen vom jeweiligen Eröffnungskurs gesetzt. Der Payoff der Referenzstrategie lässt sich so um rund 8% übertreffen. Es zeigt sich dabei, dass die Volatilität der vergangenen 10 Tage einen erklärenden Einfluss auf die Höhe der optimalen Auslenkung hat. Die Überperformance lässt sich durch Aufteilung der Daten in Tief- und Hochvolatilitäts-umfeld auf beinahe 10% steigern.

Der zweite Ansatz basiert auf der Suche ähnlicher Kursverläufe in der Vergangenheit mittels K-Nearest-Neighbor Verfahren. Die Überperformance dieses Ansatzes liegt bei ebenfalls rund 8%. Die Analyse zeigt ferner, dass die Güte des Modelles mit steigender Anzahl Vergleichskurse zunimmt. Stehen genügend Vergleichskurse zur Verfügung, kann eine Sättigung des Lerneffekts beobachtet werden.

Im dritten Ansatz werden die Kauf- und Verkaufsschranken mittels neuronaler Netze vorhergesagt. Als einzige der untersuchten Methoden wird mit diesem Verfahren auch die Verteilung der prognostizierten Preise miteinbezogen. Es resultieren Überschussrenditen bis 15% im Vergleich zur Referenzstrategie. Dabei zeigt sich, dass sowohl mit der Modellierung ordinaler Preisklassen als auch mit der Modellierung voneinander abhängiger Innertagspreise bessere Ergebnisse erzielt werden können, als bei der Modellierung voneinander unabhängiger Preise.

## 1 Einleitung

### 1.1 Motivation

Aktienoptionen sind derivative Finanzinstrumente, welche dem Inhaber das Recht (nicht aber die Pflicht) geben, die zugrunde liegende Aktie (auch Basiswert oder Underlying) zu einem im Voraus festgelegten Ausübungspreis (auch Strike) zu kaufen oder zu verkaufen. Wie sich der Preis einer Option entwickelt, ist dabei von verschiedenen Faktoren abhängig. Dazu gehören unter anderem der Preis des Basiswertes, dessen Volatilität oder die Restlaufzeit der Option.

Der Zusammenhang zwischen Preis des Underlyings und Preis der Option ist dabei nicht linear, sondern nimmt bei steigendem Preis zu (Kaufoption), respektive ab (Verkaufsoption). Diese Nichtlinearität wird mit Hilfe der Kennzahl Gamma ( $\Gamma$ ) beschrieben. Im professionellen Optionenhandel ist es üblich, den linearen Teil der Veränderung (Delta, auch  $\Delta$ ) durch Kauf oder Verkauf des Underlyings abzusichern. Damit lassen sich Strategien verfolgen, welche von der Richtung der Preisbewegung unabhängig sind (Delta-Neutral Trading). Der nichtlineare Zusammenhang führt allerdings dazu, dass die Delta-Neutralität mit sich ändernden Preisen wieder verloren geht. Dies sei nachfolgend an einem Beispiel demonstriert:

Sei dazu angenommen, dass eine Aktie zum Preis von 10 gehandelt wird. Die Aktie dient als Basiswert sowohl für eine Kaufoption (Call) wie auch eine Verkaufsoption (Put). Die Laufzeit betrage 6 Monate und der Strike entspreche dem aktuellen Preis und sei damit ebenfalls 10. Mit dem Kauf der Option erwirbt der Besitzer damit das Recht, die Aktie in 6 Monaten zu 10 zu kaufen (im Falle des Calls) oder zu verkaufen (im Falle des Puts).

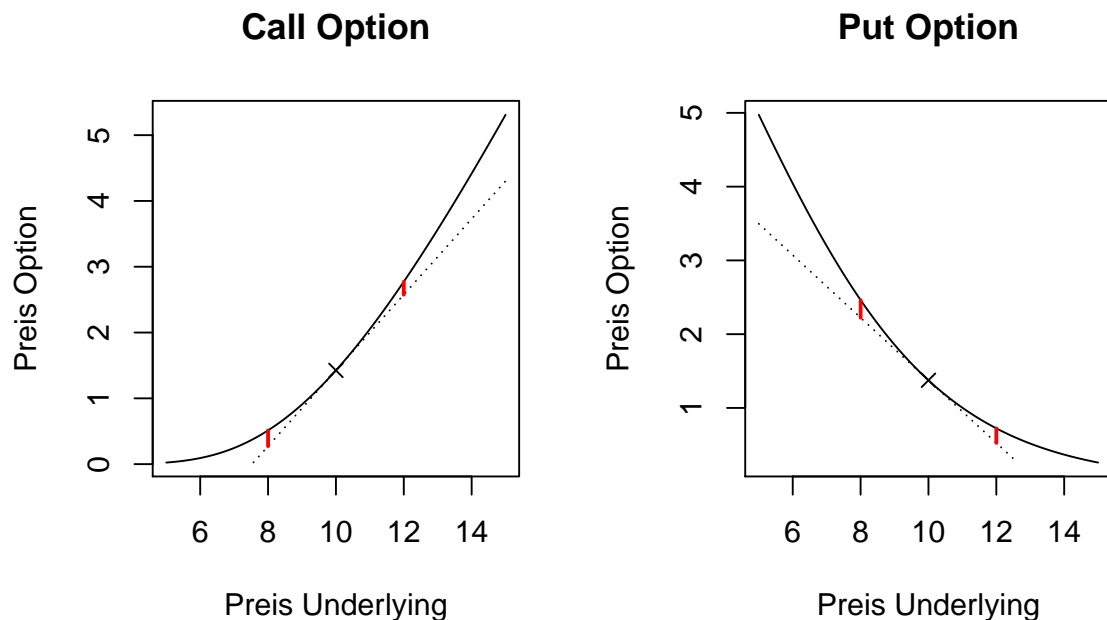


Abbildung 1: Zusammenhang zwischen Preis der Underlyings und Preis der Option.

Den Zusammenhang zwischen Preis der Option und Preis des Underlyings ist in Abbildung 1 dargestellt. Die gestrichelten Linien bilden die Tangenten beim Strikepreis der Optionen. Deren Steigungen ( $\Delta$ ) betragen 1.42 im Falle des Calls, und -1.37 im Falle des Puts. Dies bedeutet, dass sich der Besitzer der Option gegen Preisbewegungen absichern (hedgen) kann, indem er zusätzlich zum Besitz der Option die entsprechende Anzahl Aktien verkauft (Call) oder kauft (Put). Wertänderungen der Option werden dann durch die entgegengesetzte Wertentwicklung in der Aktienposition ausgeglichen. Eine solche gegenüber Preisänderungen nicht sensitive Position wird "deltaneutral" genannt.

Bei grösseren Preisbewegungen führt die Konvexität des Optionspreises allerdings dazu, dass es trotz Absicherung zu einer Abweichung kommt. Diese “Fehler” sind in Abbildung 1 mit roten Linien dargestellt. Es mag auf den ersten Blick erstaunen, dass diese Abweichung immer zugunsten des Optionsbesitzers ausfällt (sowohl für Call- als auch Put-Option verlaufen die Tangenten unterhalb des Optionspreises). Dass es sich dabei aber nicht um eine Geldmaschine handelt, liegt daran, dass die beschriebenen Preisbewegungen erst im Laufe der Zeit erfolgen und die Restlaufzeit der Option kleiner wird. Diese Sensitivität des Preises bezüglich Restlaufzeit wird durch die Kennzahl Theta (auch)  $\Theta$  beschrieben. In effizienten Märkten gleichen sich diese Effekte im Durchschnitt aus.

Wenn die zukünftigen Bewegungen des Preises grösser sind, als dies der Markt einpreist, kann die Verfolgung einer solchen Handelsstrategie allerdings lukrativ sein. Die Schwierigkeit liegt dabei in der Auswahl der richtigen Titel. Diese Strategie wird als Gamma-Scalping bezeichnet.

Der Einfluss des Gammas ist aber nicht nur zu Spekulationszwecken interessant. Dessen Bewirtschaftung ist auch für die Steuerung des eingegangenen Risikos von Relevanz. Soll nämlich die Delta-Neutralität nach Preisbewegungen wieder hergestellt werden, müssen laufend neue Titel des Underlyings gekauft oder verkauft werden. Grafisch entspricht dies der Einnahme einer Aktienposition, welche wieder der Steigung der Tangente beim nun vorherrschenden Preis entspricht. Typischerweise ist es so, dass diese Anpassungen abends (zur Reduktion des Risikos über Nacht) oder je nach Entscheidung des Händlers auch untertags erfolgen. Der Händler wird dabei versuchen, den Ausgleich nach möglichst grosser Preisbewegung zu machen, d.h. negatives Delta am Tiefstpunkt zu kaufen und positives Delta am Höchstpunkt zu verkaufen. Verpasst er diesen Zeitpunkt und die Preise entwickeln sich wieder Richtung Ausgangspunkt, so entgehen ihm mögliche Gewinne.

## 1.2 Forschungsfrage

Für die vorliegende Arbeit ergibt sich damit folgende Forschungsfrage:

Kann mit Hilfe datengestützter Methoden eine Strategie gefunden werden, welche einen Optionshändler unterstützt, die idealen (intraday) Preise zum Kauf und Verkauf von aufgelaufenem Delta zu finden?

Als Vergleich wird die Strategie herangezogen, welche keine intraday Anpassungen vornimmt, sondern die aufgelaufene Delta-Position erst am Abend ausgleicht. Die Voraussage jeweils eines Verkaufs- und eines Kaufpreises soll dabei bei Markteröffnung des jeweiligen Tages erfolgen. Bei Tagesende noch vorhandenes Delta (aufgrund nicht erreichter Kaufs- oder Verkaufspreise oder neu aufgelaufenes Delta bis Tagesende) wird immer zum Tagesschlusskurs ausgeglichen.

Mathematisch lassen sich beide Strategien mit Hilfe einer Payoff-Funktion ausdrücken.

Für die einfachere Referenzstrategie, welche die Delta-Neutralität erst bei Tagesende wieder herstellt, lautet diese wie folgt:

$$Payoff = \frac{1}{2} \times 100 \times \$\Gamma_{close_{t-1}} \times \ln \left( \frac{close_t}{close_{t-1}} \right)^2 \quad (1)$$

Für die Notation werden log>Returns verwendet. Diskrete Returns sind aber genauso möglich. Als  $close_i$  wird der Tagesendkurs am Tag  $i$  bezeichnet. Unter  $\$ \Gamma_i$  verstehen wir dabei das Gamma Cash (auch Dollar Cash). Die Herleitung dieses Payoffs ergibt sich aufgrund folgender Überlegungen (vgl. SP-Finance, 2020):

Bezeichne  $S_0$  den Preis des Underlyings und  $P_0$  den Preis der Option zu Beginn und  $S_1$  sowie  $P_1$  die jeweiligen Preise nach einer Preisbewegung des Underlyings um  $d_S$ .  $\Delta_0$  und  $\Gamma_0$  bezeichnen die erste und zweite Ableitung des Optionspreises nach dem Underlyingpreis zum Ausgangszeitpunkt. Ferner sei als Delta Cash ( $\$ \Delta = \Delta \times S$ ) der Wert des Hedge Portfolio bezeichnet und Gamma Cash ( $\$ \Gamma = \Gamma \times S^2/100$ ) bezeichne die Veränderung des  $\$ \Delta$  bei einer 1-prozentigen Veränderung des Underlying-Preises. Dies lässt sich wie folgt herleiten: Verändert sich der Underlying-Preis um 1%  $S \Rightarrow S + S/100$ , verändert sich auch das Delta  $\Delta \Rightarrow \Delta + \Gamma \times S/100$ . Das neue Delta Cash verändert sich damit in der Höhe von Gamma Cash  $\$ \Delta \Rightarrow \$ \Delta + \Gamma \times S^2/100$ .

Mit Hilfe dieser Notation lässt sich der Gewinn einer zu Beginn delta-gehedgten Position herleiten:

1. Veränderung des Underlying Preises  $S_1 = S_0 + dS$
2. Veränderung des Deltas  $\Delta_1 = \Delta_0 + \Gamma_0 \times dS$
3. Durchschnittliches Delta  $\Delta_{Avg} = (\Delta_0 + \Delta_1)/2 = \Delta_0 + \Gamma_0 \times dS/2$
4. Neuer Optionspreis  $P_1 = P_0 + \Delta_{Avg} \times dS = P_0 + \Delta_0 \times dS + \Gamma_0 \times dS^2/2$
5. Gewinn als Summe der Veränderungen des Optionspreises und des Hedge-Portfolios:  $\Delta_0 \times dS + \Gamma_0 \times dS^2/2 - \Delta_0 \times dS = \Gamma_0 \times dS^2/2$
6. Umgeformt lässt sich der Gewinn schreiben als:  $\Gamma_0 \times dS^2/2 = \frac{1}{2} \times \Gamma_0 \times S^2/100 \times dS^2/S^2 \times 100 = \frac{1}{2} \times 100 \times \$ \Gamma \times (dS/S)^2$

Auch im Falle der etwas komplexeren Strategie mit der Möglichkeit von Käufen und Verkäufen innerhalb des Tages lässt sich die gleiche Payoffstruktur wiederfinden:

$$\begin{aligned}
Payoff = & \frac{1}{2} \times 100 \times \$\Gamma_{close_{t-1}} \times \ln \left( \frac{first}{close_{t-1}} \right)^2 \times I_{first} \times (1 - I_{second}) + \\
& \frac{1}{2} \times 100 \times \$\Gamma_{first} \times \ln \left( \frac{close_t}{first} \right)^2 \times I_{first} \times (1 - I_{second}) + \\
& \frac{1}{2} \times 100 \times \$\Gamma_{close_{t-1}} \times \ln \left( \frac{second}{close_{t-1}} \right)^2 \times I_{second} \times (1 - I_{first}) + \\
& \frac{1}{2} \times 100 \times \$\Gamma_{second} \times \ln \left( \frac{close_t}{second} \right)^2 \times I_{second} \times (1 - I_{first}) + \\
& \frac{1}{2} \times 100 \times \$\Gamma_{close_{t-1}} \times \ln \left( \frac{first}{close_{t-1}} \right)^2 \times I_{second} \times I_{first} + \\
& \frac{1}{2} \times 100 \times \$\Gamma_{first} \times \ln \left( \frac{second}{first} \right)^2 \times I_{first} \times I_{second} + \\
& \frac{1}{2} \times 100 \times \$\Gamma_{second} \times \ln \left( \frac{close_t}{second} \right)^2 \times I_{second} \times I_{first} + \\
& \frac{1}{2} \times 100 \times \$\Gamma_{close_{t-1}} \times \ln \left( \frac{close_t}{close_{t-1}} \right)^2 \times (1 - I_{first}) \times (1 - I_{second}) \quad (2)
\end{aligned}$$

wobei,

$$\$_\Gamma_i = \Gamma \times S_i^2 / 100 \quad (3)$$

Zu beachten gilt es insbesondere, dass der Payoff quadratisch auf Preisbewegungen reagiert. Dies führt dazu, dass es von Relevanz ist, ob zuerst die Kaufs- oder die Verkaufsschwelle erreicht wird. Die Ausführung zum jeweiligen Schwellenwert wird durch die Indikatorvariablen  $I_{first}$  und  $I_{second}$  modelliert. Damit es zu einer Ausführung kommt, müssen dabei die folgenden beiden Kriterien kumulativ erfüllt sein:

- a) Der Schwellenwert wird erreicht.
- b) Die vorangegangene Transaktion hat bei einem höheren Preis für Aktion an unterer Schwelle, respektive tieferen Preis für eine Aktion an der oberen Schwelle stattgefunden.

## 2 Daten

### 2.1 Bezug und Umfang

#### 2.1.1 Aktienuniversum

Für die vorliegende Analyse werden die Aktienpreise grosser Unternehmen weltweit herangezogen. Konkret sind es alle Aktienkomponenten des “iShares MSCI World UCITS ETF” (vgl. Blackrock, 2020) per 28. Februar 2020.<sup>1</sup> Dieser Exchange Traded Fund (ETF) besteht zu diesem Zeitpunkt aus 1639 Aktien. Ferner stellt die Webseite des Emittenten weitere Attribute zur Verfügung. Diese lauten für das Beispiel Nestlé wie folgt:

Tabelle 1: Attribute der Nestlé Aktie per 28. Februar 2020

Attribut	Wert
Ticker	NESN
Name	NESTLE SA
Asset Class	Equity
Weight (%)	0.74265
Price	104.76
Shares	361433
Market Value	37862437
Notional Value	37862437
Sector	Consumer Staples
ISIN	CH0038863350
Exchange	Six Swiss Exchange Ag
Location	Switzerland
Market Currency	CHF

Neben eindeutigen Kennzeichnern wie “Ticker” und “ISIN” enthält der Datensatz auch Informationen zur “Asset Class”. Für die vorliegende Analyse ist hierbei lediglich die Ausprägung “Equity” zulässig. Die Kennzahlen “Weight”, “Market Value” und “Notional Value” geben Auskunft über die Grösse der betrachteten Unternehmung und eignen sich auch zum Vergleich ebendieser. Zu beachten gilt, dass im Falle von Aktien der “Notional Value” dem “Market Value” entspricht und sich dieser bis auf rundungsbedingte Differenzen auch aus der Anzahl ausgegebener Titel mal Tagesendkurs (“Shares” x “Price”) ermitteln lässt.

Als weitere Unterscheidungsmerkmale sind der Hauptbörsenplatz “Exchange” (27 unterschiedliche Ausprägungen), der Sitz “Location” (23 Ausprägungen) sowie die Währung

---

<sup>1</sup>Das Startdatum dieser Arbeit.

“Market Currency” (14 Ausprägungen) aufgeführt. Alle drei Attribute bilden stark verwandte Informationen ab. Geschlüsselt auf Kontinente ergeben sich für den Börsensitz folgende Anteile:

- Nordamerika: 44%
- Europa: 28%
- Asien: 23%
- Australien: 5%

Als letztes Attribut enthält der Datensatz Angaben zum “Sector” in welchem das jeweilige Unternehmen tätig ist. Bis auf die Kategorien “Energy” und “Other” ist jeder der 12 aufgeführten Sektoren mit mindestens 5% Anteil vorhanden. Die beiden Sektoren mit dem höchsten Anteil sind “Industrials” und “Financials”.

### 2.1.2 Preisinformationen

Für alle Titel werden die historischen Eröffnungs-, Höchst-, Tiefst- und Schlusskurse des jeweiligen Tages bezogen. Diese Daten stehen via Yahoo Finance auf täglicher Basis zur freien Nutzung zur Verfügung (vgl. Yahoo, 2020). Zu beachten gilt es hierbei, dass die Yahoo Ticker für ausserhalb der USA gehandelte Titel einen Suffix je Börsenplatz verwenden. Für die Analyse kommen so 9’212’052 tägliche Datenwerte für 1’636 Titel zusammen. Für 3 Aktien können keine Werte gefunden werden. Tabelle 2 zeigt einen Beispieleintrag für die Aktie von Nestlé per 14. Februar 2019.

Tabelle 2: Kursinformationen der Nestlé Aktie per 12. April 2019

Attribut	Wert
Ticker	NESN.SW
Date	2019-04-12
Open	96.22
Low	95.11
High	96.6
Close	95.53
Adjusted	93.08
Volume	6991647

Die Werte “Open”, “Low”, “High” und “Close” enthalten die erwähnten Eröffnungs-, Tiefst-, Höchst- und Schlusskurse des Titels. Mit “Volume” werden die Anzahl gehandelter Titel am jeweiligen Tag angegeben. Unter “Adjusted” ist der um Dividendenausüttungen korrigierte Schlusskurs aufgeführt.<sup>2</sup>

<sup>2</sup>Allfällige Aktiensplits sind in allen Werten bereits berücksichtigt.



Die Werte in Tabelle 2 sind insofern speziell, als dass sie den letzten Tag vor dem Ex-Dividend Datum von Nestlé für 2019 betreffen. Das heisst, es sind die Kurse des letzten Tages, bevor die Aktie ohne die für das Jahr 2019 ausgeschüttete Dividende gehandelt wurde. Die Dividende betrug in jenem Jahr CHF 2.45 (vgl. Nestle, 2020). Diese Differenz widerspiegelt sich als Differenz des Close- und Adjusted-Preises. Da die Titel am Folgetag ohne den Anspruch auf diese Dividende gehandelt werden, fallen diese typischerweise tiefer aus. Um eine Vergleichbarkeit der Renditen über die Zeit zu gewährleisten, ist daher eine Anpassung der Werte (Open, Low, High und Close) mit Hilfe des Adjustment-Faktors nötig. Dieser ergibt sich als Quotient von Adjusted und Close Preis und wird auf allen Einträgen angewendet.

Weiter erwähnenswert ist, dass Yahoo den Adjusted Kurs des jeweils aktuellsten Tages - ausser eben am Tag vor Ex-Dividend - mit auf aktuellen Kurs festlegt. Im Laufe der Zeit und mit neuen Ausschüttungen verändert sich damit auch die Historie der Adjusted Werte. Dies lässt sich zeigen, wenn der Beispieleintrag von Nestlé per 12. April 2019 nach der nächsten Dividendenausschüttung (27. April 2020) noch einmal abgerufen wird (vgl. Nestle, 2020). Während alle Preise ausser "Adjusted" identisch ausgewiesen sind, hat sich dieser neu auf 90.72 verändert (vgl. Yahoo, 2020). Mit der nächsten Dividendenausschüttung (voraussichtlich im April 2021) wird sich dieser Wert dann wieder ändern. Mit Hilfe der Adjustierung ist aber gewährleistet, dass die Werte vergleichbar bleiben.

## 2.2 Aufbereitung

### 2.2.1 Bereinigung

Mit Yahoo Finance wird ein bekannter Datenanbieter gewählt. Der Blick auf einige Quantilskennzahlen der Rohdaten in Tabelle 3 zeigt aber, dass dennoch einige Datenprobleme ausgemacht werden können. So enthält der Datensatz beispielsweise offensichtlich falsche Werte (z.b. negative Preise) aber auch einige Lücken.

Tabelle 3: Datenübersicht vor Bereinigung

Preis	Min	1. Quartil	Median	3. Quartil	Max	NA's
Open	0.000000e+00	12.0	35.6	156.8	3.750000e+06	135267
Low	0.000000e+00	12.0	35.2	155.0	3.600000e+06	135267
High	0.000000e+00	12.3	36.1	158.5	9.046660e+06	135267
Close	0.000000e+00	12.2	35.7	156.8	3.656250e+06	135267
Adjusted	-1.181299e+20	6.8	26.4	121.6	5.486735e+22	135267

Die Behebung dieser Mängel erfolgt in verschiedenen Schritten. Allen gemeinsam ist, dass die Bereinigung keinen Ausschluss der Daten zur Folge hat, sondern betroffene Werte

als “Nicht verfügbar, (NA)” klassifiziert werden. Diese Unterscheidung ist insbesondere bei rollierender Betrachtung eines Zeitfensters der Vergangenheit von Bedeutung.

**1. Entfernen von fehlerhaften Adjustierungsdaten**

Eine Eigenschaft von Aktienpreisen ist es, dass sie nicht negativ sein können. Der Datensatz weist aber vereinzelt negative Adjusted Werte auf. Dies lässt sich auch durch die Dividendenbereinigung nicht erklären. Bei diesen Einträgen scheinen daher Datenfehler vorzuliegen. Erschwerend kommt hinzu, dass sich Fehler bei der Adjustierung nicht auf den jeweiligen Eintrag beschränken. Aufgrund der Funktionsweise der Adjustierung (vgl. 2.1.2) ist ein Vererben des Fehlers auf andere Einträge des jeweiligen Titels wahrscheinlich. Bei genauerer Betrachtung der Adjusted Werte fällt ferner auf, dass komischerweise auch einige sehr kleine (im Bereich  $10^{-6}$ ) - wenn auch knapp positive Werte - gefunden werden können. Aus diesen Grund werden alle Ticker, welche in ihrer Historie einen Adjusted Preis von weniger als 0.001 aufweisen, ausgeschlossen.

**2. Entfernen von Einträgen mit unerwarteter Reihenfolge**

Die Werte für Open, Low, High und Close implizieren eine klare Reihenfolge. Kein anderer der Werte darf höher als das High oder kleiner als das Low sein. Ist dies der Fall, werden die entsprechenden Werte von der Analyse ausgeschlossen.

**3. Erkennen und Ausschluss von Tippfehlern**

Einzelne Einträge lassen sich als Tippfehler identifizieren. Der Titel “AV.L” weist per 09. August 2019 beispielsweise einen Low-Wert von 3.87 aus, während alle andern Werte des gleichen Tages wie auch der benachbarten Tage bei ca. 380 liegen. Es liegt auf der Hand, dass dieser Wert um einen Faktor 100 falsch erfasst wurde. Solchen Fehlern wird begegnet, indem alle paarweisen Verhältnisse von Open, Low, High und Close Preis kleiner als 8 sein müssen. Andernfalls erfolgt ein Ausschluss der als Tippfehler identifizierten Kennzahl.

**4. Fehlende Preisbewegungen innerhalb des Tages**

Der Aktienkurs eines grösseren Unternehmens bewegt sich typischerweise auch an ruhigen Börsentagen immer ein wenig. Die vorhandenen Preise liegen mit der Genauigkeit mehrerer Nachkommastellen vor. Unterscheiden sich hierbei Tagestiefst- und Tageshöchstpreis nicht, muss von einem Datenfehler ausgegangen werden. Einträge ohne Preisbewegung innerhalb des Tages werden daher von der Analyse ausgeschlossen.

**5. Fehlende Kursbewegungen über nacheinander folgende Börsentage**

Ähnlich wie bei den Preisbewegungen innerhalb des Tages verhält es sich auch bei Bewegungen über sich folgende Börsentage hinweg. Es ist zu erwarten, dass sich mindestens einer der fünf betrachteten Preise vom Vortag unterscheidet. Ist dies nicht der Fall, wird der Eintrag ausgeschlossen.

**6. Aussergewöhnlich hohe Preisbewegungen**

Es liegt in der Natur der Sache, dass sich Aktienkurse verändern. Grosse Kurs-sprünge sind bei Aktien sehr grosser Unternehmen - wie sie in dieser Arbeit be-

trachtet werden - aber selten. Die Wahrscheinlichkeit, dass das Verhältnis zwischen adjustiertem Preis des Vortages und adjustiertem Preis des aktuellen Tages (und vice versa) richtigerweise grösser ist als ein Faktor 2, erachten wir als klein. Entsprechende Einträge werden deshalb entfernt.

#### **7. Ausschluss von Extremwerten**

Die der vorliegenden Analyse zugrundeliegende Payoff-Funktion ist abhängig von den Preisbewegungen einer Aktie innerhalb des Tages (vgl. 1.2). Speziell dabei ist, dass die Höhe der Bewegung nicht linear, sondern quadratisch Niederschlag findet. Dies führt dazu, dass die Analyse sehr sensitiv auf Ausreisser reagiert. Hinzu kommt, dass es Ziel der Arbeit ist, Aussagen über Kursbewegungen eines "typischen" Börsentages zu machen. Eine Prognose von Werten an aussergewöhnlichen Tagen liegt ausserhalb des Geltungsbereichs der Analyse. Aus diesem Grund werden nach obigen Bereinigungen für jede der fünf Preiskennzahlen die jeweils 1% extremsten Werte nach oben wie auch unten ausgeschlossen. Der Ausschluss erfolgt aufgrund der unterschiedlichen Preisniveaus der Aktien auf einem täglich auf den Schlusskurs des Vortages indexierten Wert.

#### **8. Verfügbarkeit durchgängiger Historie**

Zur Prognose des zukünftigen Preisverlaufs könnte der direkt vorangegangene Verlauf von Bedeutung sein. Es werden daher alle Datensätze ausgeschlossen, für welche keine durchgängige Historie von 10 Börsentagen verfügbar ist.

Zusammenfassend lässt sich festhalten, dass der rohe Datensatz aus 9'212'052 Einträgen besteht. Davon weisen 135'267 Zeilen vor Bereinigung einen fehlenden Wert auf. Nach Bereinigung erhöht sich dieser Wert auf 3'639'965. Für die Analyse bleiben somit 5'572'087 verwendbare Einträge.

### **2.2.2 Normalisierung**

Eine weitere Herausforderung, welche sich beim Vergleich verschiedener Aktien ergibt, ist deren unterschiedliches Preisniveau. Während eine Aktie bei USD 30 handelt, bewegt sich eine andere auf einem Niveau von USD 1000. Eine Vergleichbarkeit lässt sich herstellen, wenn nicht absolute Preise, sondern relative Returns in die Analyse einfließen. Tatsächlich ist dies in der Payoff-Funktion grösstenteils sichergestellt. Das absolute Preisniveau fliesst allerdings auch in die Berechnung des Gamma Cash mit ein. Um auch hier eine Vergleichbarkeit der Werte sicherzustellen, wird bei allen nachfolgenden Analysen der Preis des adjustierten Vortagesendkurs auf ein Niveau von 100 (dies entspricht dem letzten Neutralisierungszeitpunkt des Deltas) standardisiert.

Sind all diese Schritte durchgeführt, lässt sich der Payoff berechnen. Da der Payoff - wie bereits ausgeführt - quadratisch auf Preisveränderungen reagiert, lohnt sich an dieser Stelle eine Untersuchung der Daten auf einflussreiche Beobachtungen. Ist der gesamte Payoff über alle Datensätze hinweg durch wenige Einträge dominiert, könnten nachfolgende Analysen verfälscht werden. In diesem Fall besteht die Gefahr, dass sich lernende

Algorithmen zu stark an diesen Einträgen orientieren. Weniger einflussreiche aber häufiger realisierte Beobachtungen gingen dabei unter. Dies ist insbesondere unter dem Gesichtspunkt von Relevanz, als dass vorliegende Analysen auf eine Prognose “normaler” Marktsituationen abzielt.

Zur Veranschaulichung einflussreicher Beobachtungen zeigt Abbildung 2 die Lorenzkurve des Payoffs (bei Tagesend-Ausgleich) über alle in der Analyse berücksichtigten Werte. Dazu werden die Payoffs der einzelnen Einträge in aufsteigender Weise sortiert. Deren kumulativer Anteil (Y-Achse) wird dem kumulativen Anteil der Datenpunkte (X-Achse) gegenübergestellt. Bei genau gleichverteiltem Beitrag jedes einzelnen Eintrages zum Payoff würde eine Gerade mit Steigung  $45^\circ$  resultieren. Je stärker der Einfluss einzelner Beobachtungen, desto stärker konvex die Kurve.

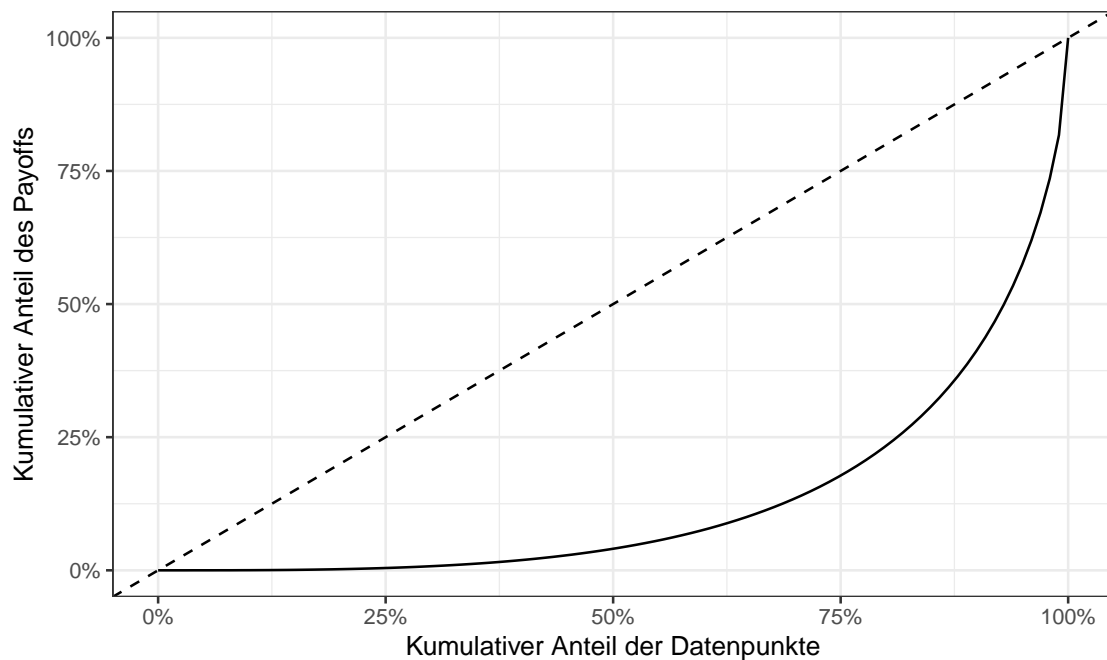


Abbildung 2: Lorenzkurve des Payoffs

Im vorliegenden Fall weist die Lorenzkurve eine deutliche Konvexität auf. Zumal im Datensatz sowohl unterschiedliche Titel als auch ein langer Zeithorizont mit volatileren als auch ruhigeren Marktsituationen repräsentiert ist, überrascht dieses Ergebnis nicht. Eine gewisse Vielfalt der Daten ist im Hinblick auf die Vorhersage von unterschiedlichen Kauf- und Verkaufspreisen gar erwünscht. Sollen nachfolgende Algorithmen ja gerade versuchen, die unterschiedlichen Preisschwankungen zu prognostizieren. Andererseits zeigt die Darstellung auch, dass kein allzu extremer Einfluss einzelner Einträge auszumachen ist. In diesen Fällen wäre die Kurve fast auf dem unteren und rechten Rand der Grafik zu liegen gekommen. Es lässt sich damit der Schluss ziehen, dass die Bereinigung der Daten für den vorliegenden Zweck erfolgreich war. Die Daten zeigen die

gewünschte Variabilität, ohne dass dabei wenige Extremwerte das Ergebnis verfälschen würden.

### 2.2.3 Volatilitätsmass

Vorliegende Analyse basiert auf einer Vielzahl ganz unterschiedlicher Aktien. Es ist bekannt, dass die Preise unterschiedlicher Titel in gleichen Marktsituationen mit unterschiedlich starken Ausschlägen reagieren. Beispielsweise reagieren Unternehmen, welche im Luxusgüterbereich (beispielsweise Richemont, Swatch) tätig sind stärker als Anbieter im Bereich der Grundversorgung (beispielsweise Nestle). Man spricht in diesem Zusammenhang auch von zyklischen und defensiven Werten (vgl. Asimas, 2018).

Auch für die nachfolgenden Analysen ist die Volatilität ein wichtiges Mass. Es lohnt sich daher an dieser Stelle über folgende Fragen klar zu werden: - Welcher Volatilitätsschätzer soll verwendet werden? - Über welche Zeitdauer soll die Volatilität geschätzt werden? - Soll ein gleichgewichteter Schätzer verwendet werden, oder ein gewichteter?

Wir entscheiden uns für einen Volatilitätsindikator von Yang and Zhang (2000). Dieser ist in der Lage, nicht nur Close-to-Close Preise, sondern alle im Datensatz vorhandenen Preise - namentlich Open, High, Low und Close - zu berücksichtigen. Es handelt sich dabei um eine modifizierte Version des Garman und Klass Schätzers, der auch mit Opening Sprüngen umzugehen weiss.

Als Zeitdauer zur Volatilitätsmessung wählen wir 10 Tage. Dies ist einerseits ein gebräuchliches Standardfenster, zudem erfolgte auch die Datenaufbereitung (vgl. 2.2.1) auf der Bedingung, dass für jeden im Datensatz verbliebenen Eintrag dieses Fenster ohne Unterbruch vorhanden sein muss. Auf eine Gewichtung des Schätzers wird aus Gründen der Einfachheit verzichtet.

## 3 Infrastruktur und Tools

### 3.1 Cloud Setup

Gewisse in dieser Arbeit durchgeführte Analysen sind sehr rechen- und speicherintensiv. Sie stellen damit erhöhte Anforderungen an die eingesetzte Infrastruktur. Für die vorliegenden Analysen stellte sich folgender Setup mit drei unterschiedlichen virtuellen Maschinentypen (VMs) als geeignet heraus:

- Datenaufbereitung: Eine Maschine mit 4 Cores und mindestens 32 GB Memory zum Prototyping und die Datenaufbereitung
- Multi-CPU: Eine Maschine mit mindestens 16 CPUs zur Berechnung parallelisierbarer Aufgaben (z.B. KNN) auf grösseren Datensätzen
- GPU: Eine Maschine mit mindestens 16 GB RAM, 4 CPUs und einer für kleinere Machine Learning Probleme geeigneten GPU (beispielsweise NVIDIA Tesla K80 oder NVIDIA Tesla M60).

Im Rahmen dieser Arbeit wurden drei der bekanntesten Cloud-Anbieter ausprobiert. Aus Sicht des Autors unterscheiden sich diese in ihrer Handhabung stärker, als dies ursprünglich hätte vermutet werden können. Der Aufbau eines geeigneten Infrastruktursetups stellte sich - trotz auf den ersten Blick vorgefertigter Lösungen - als zeitintensiv heraus. Da sich eine einmal gefundene Einstellung aber auch in späteren Projekten wiederverwenden lässt, rechtfertigt sich dieser Aufwand. Die gemachten Erkenntnisse seien an dieser Stelle daher festgehalten.

Allen nachfolgend beschriebenen Lösungen sehen ein für Studenten kostenfreies Start-Kontingent vor. Die Ausführungen beziehen sich auf diese. Ebenfalls allen Anbietern gemein ist, dass sich virtuelle Computer mit wenigen Klicks und dem gewünschten Betriebssystem erstellen lassen. Alle drei getesteten Dienste bieten ferner neben normalen Instanzen auch sogenannte “Spot” Instanzen an. Diese unterscheiden sich von normalen VMs insofern, als dass es sich dabei um Einmalinstanzen handelt. Einmal beendet erlöschen diese. Bei grosser Nachfrage nach Rechenkapazität können Spot Instanzen vom Anbieter zudem ohne Vorwarnung heruntergefahren werden. Sie eignen sich daher nur für nicht unterbrechungsanfällige Prozesse. Im Gegensatz sind sie deutlich günstiger als reguläre Instanzen.

### **3.1.1 Microsoft Azure**

Die Cloud-Computing Dienste von Microsoft nennen sich Azure. Die Plattform bietet verschiedene vordefinierte Maschinentypen, welche sich im Wesentlichen in der Anzahl CPU, RAM und Grösse des persistenten Speichers unterscheiden. Einige Maschinen bieten zudem Zugriff auf eine oder mehrere GPU(s).

Beim Test zeigte sich allerdings, dass trotz Account für Bildungseinrichtungen oft keine Maschinen verfügbar waren. Die Verfügbarkeit war im Test dabei sehr abhängig von der jeweiligen Tageszeit. Während am frühen Morgen Mitteleuropäischer Zeit oft Maschinen verfügbar waren, war dies oft weder am Nachmittag noch am Abend der Fall. Die grösste VM, welche während des Tests erstellt werden konnte, war eine NC6 Instanz mit 6 CPUs 56 GB Memory und einer NVIDIA Tesla K80 GPU. Insbesondere für CPU-lastige Analysen stellte sich dieser Setup als zu wenig leistungsstark heraus.

Bei allen anderen Anbietern unterscheidet sich die Verfügbarkeit der VMs je nach Region. Bei Azure kommt allerdings erschwerend hinzu, dass alle Regionen einzeln durchprobiert werden müssen. Spot Instanzen stehen zudem nur für gewisse Maschinentypen zur Verfügung. Auch für die oben erwähnte Instanz stand diese Option im Test nicht zur Verfügung.

Spot Instanzen lassen sich vor allem dann gut nutzen, wenn Systemabbilder einfach erstellt und davon später wieder neue Instanzen erzeugt werden können. Azure unterscheidet sich hier von seinen Konkurrenten insofern, als dass dies nicht einfach auf Knopfdruck gelingt. Viel mehr muss manuell erst eine “Generalisierung” der Instanz vorgenommen werden (vgl. Microsoft, 2020).

Die Beurteilung der Qualität der Dokumentation ist subjektiv. Aus Sicht des Autors ist diejenige von Azure weniger ausführlich und selbsterklärend als diejenige der anderen getesteten Kandidaten.

### 3.1.2 Google Cloud

Die Cloud-Computing Dienste von Google nennen sich “Google Cloud”. Neu registrierte Kunden profitieren im Vergleich mit den anderen Anbietern vom höchsten kostenlosen Startguthaben (Azure mit Studenten Account: \$100, AWS (\$30) mit Github Starter Package (\$70): \$100, Google Cloud: \$300).

Die Management Oberfläche wirkt im Vergleich zu den Konkurrenten sehr aufgeräumt. Die Dokumentation ist gut. Als einzige der getesteten Anbieter konnten die VMs zudem völlig individuell gestaltet werden (Anzahl CPU, Memory, Anzahl und Art GPU).

Als Nachteil entpuppte sich im Test allerdings das komplexe Limitensystem. Fast alle Komponenten unterliegen verschiedenen Limiten. Um eine GPU hinzuzufügen, müssen beispielsweise gleichzeitig die Limiten für “GPU global”, “GPU der gewählten Region” und “GPU des jeweiligen Typs” (Beispielsweise NVIDIA Tesla K80) erfüllt sein.

Die Standardeinstellungen des Testaccounts erlaubten Instanzen bis 24 CPUs. Mehr Einheiten waren nicht möglich. Die Standardeinstellung für GPUs beträgt gar 0. Eine Erhöhung der Quote kann im Management Portal beantragt werden. Im Test zeigte sich jedoch, dass sowohl Anträge zu Erhöhung der CPU wie auch GPU Limiten automatisch abgelehnt wurden. Die Erstellung einer Instanz mit GPU gelang so auch über mehrere Tage hinweg nicht. Schriftliche Kontaktaufnahmen mit der Bitte die GPU Limite auf 1 zu erhöhen wurden trotz Begründung wiederholt abgelehnt. Auch nach telefonischer Kontaktaufnahme mit dem Support gelang es nicht, die Quote zu erhöhen. Das Problem stiess beim Mitarbeitenden von Google zwar auf Verständnis, er selbst konnte die Quote allerdings ebenfalls nicht erhöhen.

### 3.1.3 Amazon Web Services (AWS)

Das Cloud Computing Angebot von Amazon nennt sich “Elastic Compute Cloud” (Amazon EC2). Als Einziger der getesteten Anbieter fällt dieser im Test nicht durch nicht verfügbare Maschinentypen oder unzureichende Limiten auf. Ferner können auch die meisten VMs (im Test bis 40 CPUs) als Spot Instanzen ausgeführt werden. Da die Imageerstellung erfolgt sehr einfach auf Knopfdruck. AWS fällt zudem durch eine sehr gute und ausführliche Dokumentation auf. So ist beispielsweise die Erstellung eines von der Instanz unabhängigen persistenten Speichers (in AWS-Lingo: EBS) sowie der Prozess zum Mounten ebendieses Schritt-für-Schritt erklärt (vgl. Amazon, 2020). Damit kann auch bei der Verwendung von Spot Instanzen dauerhaft gespeichert werden. Ferner sind auch die Preise im Vergleich zur Konkurrenz sehr transparent und wettbewerbsfähig.

Da auch nach längeren Versuchen nur mit AWS die oben beschriebene Ziel-Infrastruktur erreicht werden konnte, wurde für die vorliegende Arbeit dieser Anbieter als Cloud Computing Lösung verwendet.

## 3.2 Verwendete Software

Zur Durchführung der Analysen hat sich der abwechselnde Einsatz von R und Python bewährt. Es zeigte sich, dass beide Tools / Sprachen ihre Stärken in verschiedenen Bereichen haben. Grundsätzlich lässt sich dies so zusammenfassen, dass datenaufbereitende Schritte in R durchgeführt wurden. Für das Training der neuronalen Netze stellten sich die entsprechenden Bibliotheken von Python als geeigneter heraus.

### 3.2.1 R / RStudio Server

Die Datenaufbereitung und -bereinigung sowie Analysen mit Ausnahme der neuronalen Netze wurden in der Sprache R und der Entwicklungsumgebung RStudio Server durchgeführt. Erstere kann auf eine sehr breite Community mit entsprechend gut dokumentierten Beispielen in diversen Foren zurückgreifen. Ferner hat sich in den letzten Jahren unter dem Namen “tidyverse” eine Sammlung gut unterhaltener und dokumentierter Packages zum defacto-Standard etabliert. Dieses wird von Mitarbeitern der Firma RStudio unterhalten und steht zur freien Nutzung zur Verfügung. Gleiche Firma ist es auch, welche unter dem Namen RStudio Server eine hostbare Entwicklungsumgebung (IDE) anbietet. Diese wird in einer gratis verfügbaren und einer kostenpflichtigen Variante angeboten. Für die Arbeit wurde die freie Version verwendet. Verschiedene Builds für die gängigsten Linux Distributionen stehen auf der Unternehmenswebseite zur Verfügung (vgl. RStudio, 2020). Der Zugriff auf die IDE erfolgt über den Browser. Das Look and Feel unterscheidet sich nicht von der ebenfalls frei verfügbaren lokalen Installation. Dies ist insbesondere darum interessant, da sich der Programmcode so direkt auf den erstellten Cloud Instanzen entwickeln lässt.

Schwächen von R zeigten sich in der inherenten Single-Threadigkeit des Tools. Die Multithreadigkeit kann mit Hilfe zusätzlicher Packages (beispielsweise parallel, pbapply) erreicht werden und ist insbesondere beim Einsatz auf der oben beschriebenen Multi-CPU Instanz von Relevanz. Zwar stehen auf R Packages für Keras und Tensorflow zur Verfügung, deren Verwendung im Zusammenspiel mit RStudio Server stellte sich allerdings als sehr instabil heraus. Dies manifestierte sich in mehreren Abstürzen der Entwicklungsumgebung. Da diese Packages selber lediglich Wrapper auf die gleichnamigen Python Libraries sind, stellte sich deren Verwendung direkt in Python als die bessere Variante heraus.

Zum von Daten zwischen den beiden Sprachen stellte sich der Weg über zwischengespeicherte “Feather” Files als am geeignetsten heraus. Es handelt sich dabei um ein Format, das beide Sprachen auch für grössere Datenmengen sehr performant laden und speichern können. Tatsächlich kann in R / RStudio mit Hilfe des Packages “reticulate”



auch Python Code direkt ausgeführt werden, respektive Objekte beider Sprachen in einem gewissen Masse automatisch ausgetauscht werden. Auf diesen Austausch wurde im vorliegenden Fall allerdings verzichtet.

Eine Eigenheit der Sprache R stellt zudem die matrix- und vektorbasierte programmierweise dar. Zwar sind gleiche Manipulation auch mit klassischer “loop-Ansätzen” möglich. Diese gehen allerdings mit erheblichen Performanceeinbussen (speziell bei der Bearbeitung grosser Datenmengen) einher. Es hat sich daher bewährt, performancekritische Funktionen in C++ zu schreiben. Das Package “Rcpp” übernimmt dabei die Verknüpfung dieser Funktionen in R.

### 3.2.2 Python / (Ana)conda

Für Python stand keine auf dem Server ausführbare Entwicklungsumgebung zur Verfügung. Da sich der Einsatz von Python allerdings auf das Training neuronaler Netze beschränkte, reichte die Verwendung eines Jupyter Notebook Servers. Auf diesen lässt sich wiederum einfach via Webbrowser zugreifen.

Ebenfalls als wertvoll zeigte sich die Verwendung von conda Environments. Diese erlauben projektspezifische Bibliotheksinstallationen sowohl für Python als auch R. Es zeigte sich, dass das erwähnte Problem der Instabilität von Keras und Tensorflow in R bei der direkten Verwendung von Python nicht auftauchte. Erwähnt sei hier aber, dass für die Verwendung der GPU Version auf dem System sowohl passende Grafiktreiber sowie die zur Tensorflow Version passende Version von CUDA installiert sein muss (vgl. Tensorflow, 2020).

## 4 Analyse

Nachfolgende Analyse hat das Ziel einen Kauf- sowie einen Verkaufskurs zu prognostizieren, bei dem der Delta-Hedge von Optionen mit maximalem Payoff erfolgen kann. Zu diesem Zweck werden verschiedene Methoden ausprobiert und miteinander verglichen. Diese sind:

- Einfache Optimierungen
- Nearest Neighbors (KNN)
- Neuronale Netze

Allen Analysen gemein ist, dass gefundene Strategien mit der Referenzstrategie verglichen wird, welche keine innertägliche Anpassung des Deltas vorsieht. Eine weitere Gemeinsamkeit liegt darin, dass die verwendeten Daten keine Aussage über den Verlauf des Preises innerhalb des Tages zulassen. Insbesondere kann nicht ermittelt werden, ob zuerst eine obere oder eine untere Preisgrenze überschritten wurde. Da diese Reihenfolge aber wie in Kapitel 1.2 ausgeführt von Relevanz ist, wird für alle Analysen ein Ansatz verwendet, bei welchem zufällig bestimmt wird, ob am jeweiligen Tag zuerst eine

Abwärts- oder eine Aufwärtsbewegung stattgefunden hat.<sup>3</sup> Auch ein mehrmaliges Erreichen der Kauf- und Verkaufsschwelle ist innerhalb des Tages bei sehr fluktuierenden Preisen in Realität denkbar. Es wären bezüglich Optimierung des Payoffs sogar sehr wünschenswerte Ereignisse. Auf die Berücksichtigung solcher Fälle wird in der Analyse allerdings verzichtet. Das Bewusstsein über deren Existenz ist aber bei der Interpretation der Ergebnisse interessant, da die Payoffs der gefundenen Strategien diesbezüglich als untere Grenzen betrachtet werden können.

Eine weitere Gemeinsamkeit der Analysen ist, dass der analysierte Datensatz in einem ersten Schritt in ein Trainings- (80%) und ein Testdatensatz (20%) aufgeteilt wird. Diese Aufteilung erfolgt zufällig und zwecks Vergleichbarkeit für alle Methoden gleich.

## 4.1 Einfache Optimierungen

### 4.1.1 Ohne Berücksichtigung der Marktvolatilität

Eine erste Möglichkeit, optimale Kauf- und Verkaufspreise zu finden, besteht darin, diese als prozentuale Abweichungen vom aktuellen Eröffnungspreis festzulegen. Die resultierenden Payoffs bei einer solchen Festlegung lassen sich dann ins Verhältnis zum Referenzpayoff mit Ausgleich per Tagesende stellen. Ein Payoff-Verhältnis über 1 kennzeichnet damit eine Strategie, welche der Referenzstrategie überlegen ist. Verhältnisse unter 1 kennzeichnen unterlegene Strategien.

Dieses Verhältnis veranschaulicht Abbildung 3 für unterschiedliche Auslenkungshöhen. Lesebeispiel: Werden die Kauf- und Verkaufspreise 2.5% unter und über dem Eröffnungskurs des jeweiligen Tages gesetzt, so resultiert ein Gewinn, welcher rund 8% über demjenigen der Referenzstrategie liegt.

Bei genauerer Betrachtung weist die Kurve einige interessante Eigenschaften auf: Der höchste Payoff wird bei einer Auslenkung der Preise um 0.9% erreicht. Der Payoffüberschuss beträgt an diesem Punkt rund 8.3%. Gleichzeitig zeigt sich, dass ein mehr oder weniger konstanter Überschuss von rund 8% im ganzen Auslenkungsbereich von 0.7 bis rund 4% erreicht werden kann.

Während im Bereich tieferer Auslenkungen viele kleinere Gewinne realisiert werden, sind es beim Setzen breiterer Schranken nur noch wenige, dafür grössere. Die Kurve zeigt, dass sich diese beiden Effekte im genannten Bereich in etwa die Waage halten. Dieses Ergebnis ist insofern interessant, als dass die genaue Preisbestimmung gar nicht von so grosser Relevanz sein könnte. Wichtig dabei zu erwähnen ist auch, dass während der Datenbereinigung tendenziell grosse Auslenkungen aus dem Datensatz entfernt wurden (2.2.1). Werden vermehrt auch extreme Marktbewegungen zugelassen, verschiebt sich die optimale Auslenkung der Preisschranken nach oben. In Kombination mit der Erkenntnis,

---

<sup>3</sup>Alternative denkbare Vorgehensweisen sind: Immer zuerst Aufwärtsbewegung, immer zuerst Abwärtsbewegung, immer die bezügl. Payoff schlechtere Reihenfolge oder immer die bezüglich Payoff bessere Variante.

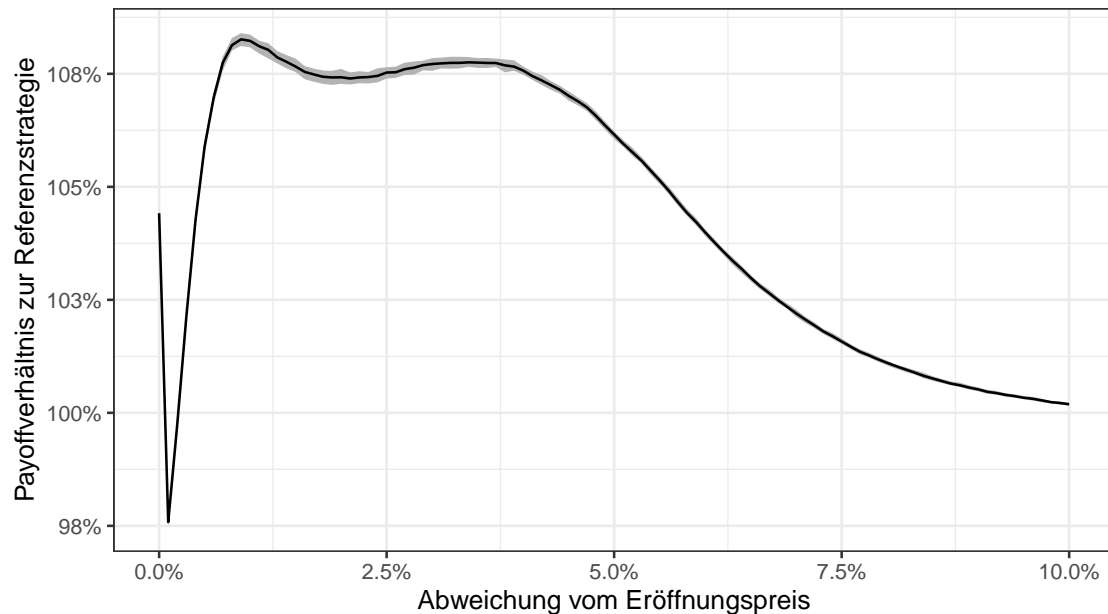


Abbildung 3: Payoffvergleich bei symmetrischer Abweichung vom Eröffnungspreis (ohne Berücksichtigung Marktvolatilität)

dass auch bei stärkerer Bereinigung gute Payoffs bis 4% Auslenkung erreicht werden, könnte dies eine Motivation sein, die Preise eher breiter zu setzen.

Eine weitere Besonderheit der Kurve zeigt sich mit dem Abwärtsknick bei sehr kleinen Auslenkungen. Erklären lässt sich dieser Knick dadurch, dass bei allen Kursverläufen, bei denen der Eröffnungskurs gleichzeitig Höchst- oder Tiefstkurs ist, mindestens eine Schranke nicht mehr erreicht werden kann. Bereits beim Setzen etwas grösserer Schranken wird dieser Effekt wieder mehr als ausgeglichen.

Auffällig ist auch die Tatsache, dass eine Auslenkung von 0 (und damit einem Wiederherstellen der Delta-Neutralität gleich zum Eröffnungskurs) eine deutlich bessere Performance als die Referenzstrategie aufweist. Dies lässt sich damit erklären, dass die Werte im Datensatz offenbar eine Tendenz des “Overshootings” der Eröffnungspreise zeigen. Das beobachtete Bild lässt vermuten, dass sich die Preise im Laufe des Tages in der Tendenz wieder eher Richtung Schlusskurs des Vortages entwickeln. Der Ausgleich der aufgebauten Delta-Position “über Nacht” gleich zum Eröffnungskurs scheint damit besser, als bis am Abend zu warten. Eine praktische Schwierigkeit könnte aber eine noch geringe Liquidität der Märkte bei Marktöffnung sein.

Schliesslich stellt sich auch die Frage, inwiefern die gefundenen Ergebnisse als statistisch signifikant bezeichnet werden können. Zur Beurteilung dieser Frage wurde mittels Bootstrapverfahren ein 95%-Konfidenzband der Kurve ermittelt. Dieses ist als grau schraffierte Fläche am Rand der Kurve ersichtlich. Es zeigt sich, dass dieses Band relativ

schmal ausfällt. Dies kann als Konsequenz der ausführlichen Datenbereinigung gesehen werden. Diese führt dazu, dass auch über verschiedene Bootstrap-Samples hinweg die Payoffs stabil und wenig beeinflusst durch einzelne Beobachtungen ausfallen.

Als zweites Mass zur Beurteilung der Aussagekraft lassen sich auch die Werte des Testdatensatzes heranziehen. In diesem beträgt der Payoffüberschuss im Vergleich zur Referenzstrategie bei 0.9% Auslenkung ebenfalls rund 8.3% und auch bei einer Auslenkung von 4% kommt der Überschuss bei 7.7% zu liegen. Beide Werte zeigen damit hohe Ähnlichkeit zum Trainingsdatensatz.

#### 4.1.2 Mit Berücksichtigung der Marktvolatilität

Die bisherige Analyse untersucht die Auslenkung der Kauf- und Verkaufspreise um den gleichen prozentualen Wert für alle Einträge im Datensatz. Die Bimodalität der Kurve in Abbildung 3 deutet darauf hin, dass es sich dabei um eine Überlagerung mehrerer Kurven handeln könnte. Gelänge es, diese zu separieren und einzelnen Gruppen von Kursverkäufen zuzuweisen, könnten individuellere Preisschranken gewählt werden. Mit Hilfe dieser könnte der Payoff im Idealfall weiter gesteigert werden.

Als Klassifizierungsmerkmal sei dazu die Volatilität der vergangenen 10 Handelstage herangezogen. Die Vermutung liegt nahe, dass eine volatile Marktsituation in der kurzfristigen Vergangenheit auch am nächsten Tag fortgesetzt werden könnte (beispielsweise Zeiten mit vielen marktrelevanten Informationen wie Finanzkrise, Corona-Krise, Dividenden-Saison). Umgekehrt könnten eher ruhig verlaufende Börsentage in den vergangenen Tagen auf eine ruhige Situation auch am aktuellen Tag hinweisen (beispielsweise ruhigere Börsentage während Sommerferien).

Um dies zu untersuchen werden alle Einträge des Datensatzes in zwei Gruppen aufgeteilt. Einträge, welche eine aktuelle 10-Tages-Volatilität über dem Median aufweisen, werden einer Gruppe hoher Volatilität, die andern Einträge einer Gruppe tiefer Volatilität zugeordnet. Zu beachten gilt es hierbei, dass der Medianwert dabei einerseits nur innerhalb des jeweiligen Tickers betrachtet wird und für dessen Berechnung auch nur vergangene Werte miteinbezogen werden.

Für beide Gruppen lassen sich danach im Trainingsset die bereits bekannten Payoffvergleiche mit dem Referenzszenario durchführen und graphisch darstellen (vgl. Abbildung 4).

Die Grafiken zeigen das erwartete Bild. Für die Gruppe tieferer vergangener Volatilitäten wird der maximale Payoff bei einer Auslenkung von 0.6% erreicht. Bei der Gruppe höherer Volatilität bei 3.7%. Angewendet auf das Testset resultiert ein Payoffüberschuss von rund 9.6%. Dies ist höher als im ungruppierten Fall.

Insbesondere bei der Gruppe der höheren Volatilitäten weist die Kurve aber weiterhin eine bimodale Form auf. Es scheint, als ob mit der gemachten Gruppierung zwar ein Teil der Varianz des aktuellen Tages erklärt werden konnte, Teile davon aber weiter unerklärt

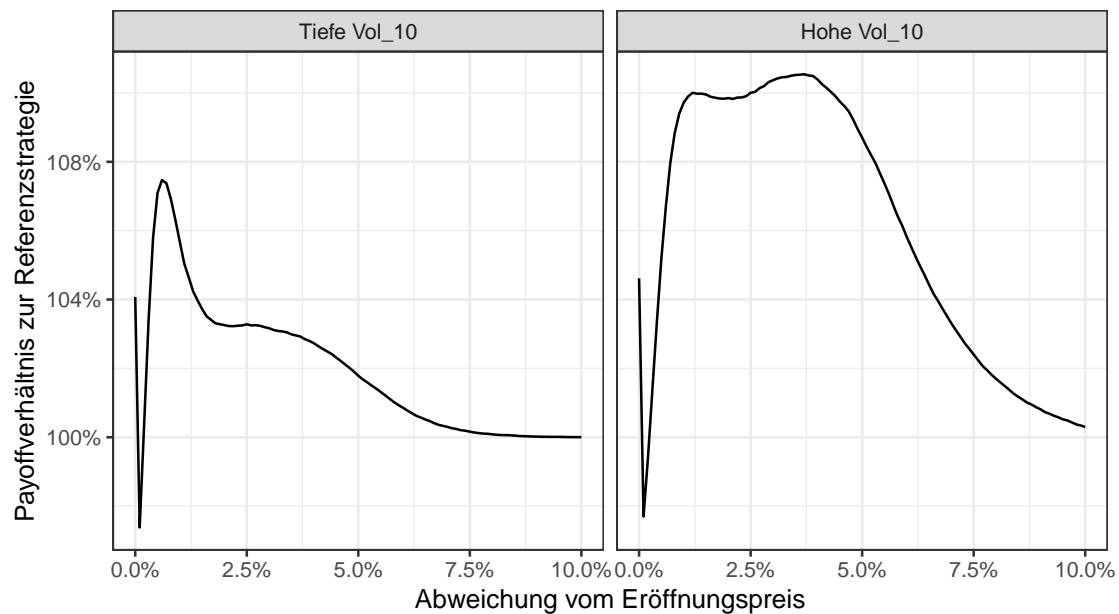


Abbildung 4: Payoffvergleich bei symmetrischer Abweichung vom Eröffnungspreis (mit Berücksichtigung Marktvolatilität)

bleiben. Eine Möglichkeit bestünde nun darin, die Anzahl Gruppierungen weiter zu erhöhen, indem beispielsweise nicht nur der Median, sondern die Quartile, Dezile, Percentile etc. als Klassifikationsgrenzen gewählt werden. Darauf sei an dieser Stelle verzichtet und zu andern Ansätzen übergegangen.

## 4.2 Nearest Neighbor Ansätze

Die ökonomische Theorie scheint keinen offensichtlichen Grund zu liefern, weshalb Aktien in genau 2 (oder  $x$ ) Volatilitätsgruppen eingeteilt werden sollten. Auf der andern Seite haben bisherige Analysen gezeigt, dass die aktuelle Volatilität ein erklärender Faktor für die aktuelle Volatilität sein kann. Im vorliegenden Kapitel soll dieser Gedanke weiter verfolgt werden.

### 4.2.1 Distanzmasse

Die Idee des Ansatzes dieses Kapitels besteht darin, nicht lediglich  $x$  vordefinierte Gruppen für symmetrische Abweichungen zu finden, sondern ähnliche Kursverläufe in der Vergangenheit zu finden und individuell darauf zu reagieren. Die zugrunde liegende Hypothese ist dabei, dass bei ausreichender Historie ähnliche Muster erkannt und daraus Rückschlüsse auf die Kursentwicklung des aktuellen Tages gemacht werden können. Die-

ses Vorgehen hat gegenüber klassischeren Regressionsansätzen den Vorteil, dass keine Annahmen über Form der Abhängigkeit gemacht werden musst (vgl. Altman, 1992).

Da es sehr unwahrscheinlich ist, die genau gleichen Kursverläufe in der Historie wiederzufinden, muss ein Distanzmass definiert werden, welches die Ähnlichkeit der Verläufe quantifiziert. Sei dafür jeder Kursverlauf  $i$  als Vektor  $hist_{i_t}$  notiert.

$$hist_{i,t} = (Open_{i,t}, High_{i,t}, Low_{j,t+1}, Close_{i,t+1}, Open_{i,t+1}, \dots, Close_{i,1}, Open_{i,0})$$

Der Index  $t$  gibt dabei an, wie viele Tage der Vergangenheit mit einbezogen werden. Ein Index von 0 bezieht sich auf den zu prognostizierenden, aktuellen Tag. Um die Ähnlichkeit zweier Einträge  $i$  und  $j$  zu berechnen, bieten sich zwei Distanzmasse an:

- 1) Die Manhattan Distanz (auch L1-Norm)

$$\|hist_{i,t} - hist_{j,t}\|_1 = |Open_{i,t} - Open_{j,t}| + |High_{i,t} - High_{j,t}| + \dots + |Open_{j,0} - Open_{j,0}|$$

- 2) Die euklidische Distanz (auch L2-Norm)

$$\|hist_{i,t} - hist_{j,t}\|_2 = \sqrt{(Open_{i,t} - Open_{j,t})^2 + (High_{i,t} - High_{j,t})^2 + \dots}$$

#### 4.2.2 Setup und Berechnungsdauer

Mithilfe obiger Distanzmasse lassen sich für jeden Kursverlauf, die  $k$  ähnlichsten Verläufe der Vergangenheit ermitteln. Zuvor seien an dieser Stelle aber einige Überlegungen zur Berechnungskomplexität des Problems gemacht: Der vorliegende bereinigte Datensatz weist 5'572'087 tägliche Kursverläufe auf. Soll jeder Kursverlauf mit jedem andern verglichen werden, so ergeben sich bei einem Brute-Force Ansatz  $5'572'087 \times 5'572'087$  Distanzberechnungen. Unter Berücksichtigung der Tatsache, dass das Problem symmetrisch ist und jeder Kursverlauf nicht mit sich selbst verglichen werden muss, halbiert sich die Komplexität zwar um mehr als die Hälfte, bleibt aber so gross, dass es zum Zeitpunkt des Schreibens dieser Arbeit nicht innerhalb weniger Sekunden oder Minuten auf einem handelsüblichen Heim-Computer berechnet werden kann.

Die für die Nearest Neighbors Suche eingesetzten Bibliotheken greifen daher typischerweise auf sophistiziertere Vorgehensweisen zurück. Eine davon sieht die Verwendung von multidimensionalen Suchbäumen (Search Trees, auch Kd-Trees) vor. Diese gehen auf eine Idee von Bentley (1975) zurück. Sie basiert darauf, dass jede Dimension in zwei Bereiche aufgeteilt wird (beispielsweise beim Median). Dadurch wird der Raum in viele kleinere Sub-Räume aufgeteilt. Der Algorithmus macht sich danach zu Nutze, dass er nicht den ganzen Raum absuchen muss. Beginnend im aktuellen Sub-Raum werden schrittweise alle benachbarten Räume abgesucht, bis die geforderte Anzahl nächster Nachbarn gefunden ist. Allerdings benötigt dabei sowohl der Aufbau des Baumes wie auch die Suche im Baum Berechnungszeit.

Die Anzahl der Dimensionen beeinflusst dabei die benötigte Zeit erheblich. Im vorliegenden Fall liegt diese im Falle einer Historie von 10 Tagen à 4 Werten bei 41, wenn zusätzlich auch der (bekannte) Eröffnungspreis des aktuellen Tages mit einbezogen wird. Tests ergaben, dass die dafür benötigte Rechenzeit zu hoch war. Die zu verwendende Zeitperiode wurde daher auf 3 Tage beschränkt. Dies resultiert in einer deutlichen Reduktion der Suchdimensionen auf 13.

Der vorliegende Fall unterscheidet sich von andern Nearest Neighbor Problemen ferner dadurch, dass für jeden Eintrag lediglich Kursverläufe der Vergangenheit betrachtet werden sollten. Im Hinblick auf die Suchstruktur bedeutet dies, dass der KD-Tree nicht nur einmalig aufgebaut und danach für alle Verläufe auf Nachbarn durchsucht werden kann. Vielmehr muss der KD-Tree für jedes Datum mit allen vorangegangenen Kursverläufen neu aufgebaut werden. Dieser spezielle Setup kommt einer Brute-Force Methode ihrerseits wieder entgegen, da aufgrund des Datums-Filter nicht stets alle Einträge durchsucht werden müssten.

Beiden Ansätzen gemein ist hingegen, dass sie sich sehr gut parallelisieren lassen und Bibliotheken zur Verfügung stehen, welche diese Methoden effizient implementieren. Wir entscheiden uns für eine KD-Tree Implementation ohne Approximation. Auf einem Rechner mit 40 Cores (20 physisch, 20 Hyperthreading Cores) dauert die Berechnung von 50 Nachbarn ca. 2 Stunden im Falle des euklidischen Distanzmasses und ca. 3 Stunden im Falle der Manhattan Distanz. Erwähnt sei an dieser Stelle aber auch, dass eine allfällige Anwendung der Methode später nur wenige Titel (respektive nur diejenigen des aktuellen Tages) umfasst. Dies ist auch unter der Verwendung einer KNN-Methode in wenigen Sekunden möglich.

#### 4.2.3 Bestimmung Kauf- und Verkaufspreise

Sind die Nachbarn eines Eintrages ermittelt, lässt sich eine Prognose für den weiteren Kursverlauf des aktuellen Eintrages ableiten. Dazu wird aus den bekannten zukünftigen Kursverläufen der Nachbarn mittels geeigneter Metrik ein Prognosewert für den aktuellen Tag abgeleitet.

Neben dem verwendeten Distanzmass bietet dieses Vorgehen weitere Freiheiten. Namentlich lassen sich die Anzahl Nachbarn und die eingesetzte Metrik zur Prognosebestimmung variieren:

- **Anzahl Nachbarn:**

In der vorliegenden Arbeit werden die 50 nächsten Nachbarn jedes Eintrages ermittelt. Einmal ermittelt lassen sich davon auch weniger verwenden. Damit kann sehr einfach der Einfluss der Anzahl Nachbarn auf die Prognosequalität ermittelt werden. Ex ante lässt sich keine Präferenz für mehr oder weniger Nachbarn finden: Es lässt sich argumentieren, dass bei der Verwendung weniger Nachbarn auch diejenigen mit grösster Ähnlichkeit verwendet werden. Insbesondere bei Marktbewegungen die relativ selten sind, könnten fernere, weniger gut passende Nachbarn

das Ergebnis verzerren. Umgekehrt lässt sich argumentieren, dass bei häufigeren Marktsituationen die Berücksichtigung und Mittelung von mehr Nachbarn zu einem unverzerrteren Ergebnis führt. Schliesslich könnte sich als drittes Ergebnis auch eine Konfiguration mit “mittlerer” Anzahl Nachbarn bewähren, wenn beide vorherigen Argumentationen verschmolzen werden. Aus diesem Grund analysiert und vergleicht die vorliegende Arbeit die Ergebnisse bei der Verwendung von 5, 20 und 50 Nachbarn.

- **Metrik der Prognoseermittlung:** `data_pred = hist_pred_train` Eine erste Möglichkeit zur Prognose von Tiefst-, Höchst- und Schlusskurs besteht darin, den Mittelwert der Kursfortsetzungen der Nachbarn zu wählen. Alternativ zur einfachen Mittelwertbildung sind auch andere Verfahren denkbar. Beispielsweise wäre auch die Berücksichtigung der Distanz als Gewichtungsfaktor möglich. Aus Gründen der Einfachheit verzichten wir an dieser Stelle darauf und verwenden neben dem gleichgewichteten Mittelwert den Median als zweites Prognosemass. Dieses reagiert weniger sensitiv auf Ausreisser innerhalb der Nachbarn.

Abbildung 5 illustriert dieses Vorgehen anhand eines Beispiels. Die Grafiken zeigen die Kursverläufe des aktuellen Eintrages (rot) sowie diejenigen der nächsten 5 Nachbarn für den zu prognostizierenden Tag ( $t$ ) sowie die 3 jeweils vorangegangenen Handelstage ( $t-1$ , ...,  $t-3$ ). Die gestrichelte rote Linie zeigt den als Mittelwert der Nachbarn prognostizierten Wert.

Sind Höchst- und Tiefstpreise prognostiziert und werden diese als Kaufs- respektive Verkaufsschranken gewählt, lässt sich der Payoff berechnen und mit demjenigen der Referenzstrategie vergleichen.

Da bei der Suche nach Nachbarn nur Einträge der Vergangenheit berücksichtigt werden, nimmt die Anzahl verfügbarer Vergleichsverläufe mit der Zeit zu. Stellt man den Payoff-Vergleich für das Trainingsset über die Zeit dar (vgl. Abbildung 6), lassen sich folgende Eigenschaften der Kurve identifizieren:

1. Hohe Volatilität des Vergleichsfaktors zu Beginn
2. Steigende Faktorhöhe mit fortlaufender Zeitdauer
3. Abflachung im Laufe der Zeit auf ein stabiles Level

Alle Eigenschaften decken sich mit der Intuition. Da zu Beginn der Datenreihe nur sehr wenige Vergleichsverläufe zur Verfügung stehen, reagiert die Kurve sehr sensitiv und schlägt entsprechend aus. Dies glättet sich im Laufe der Zeit und dem Vorhandensein von mehr Vergleichsmöglichkeiten. Die zweite Eigenschaft des steigenden Faktors zeigt, dass der erhoffte Lerneffekt einzutreten scheint. Tatsächlich scheinen ähnliche Kursverläufe in der Vergangenheit zukünftige Entwicklungen teilweise erklären zu können. Dies deckt sich mit der Erkenntnis des vergangenen Kapitels. Anders als zuvor kann dieser Lernmechanismus hier aber sehr individuell und nicht beschränkt auf zwei Gruppen erfolgen. Die dritte Eigenschaft zeigt, dass dieser Lerneffekt nach gewisser Zeit gesättigt scheint.



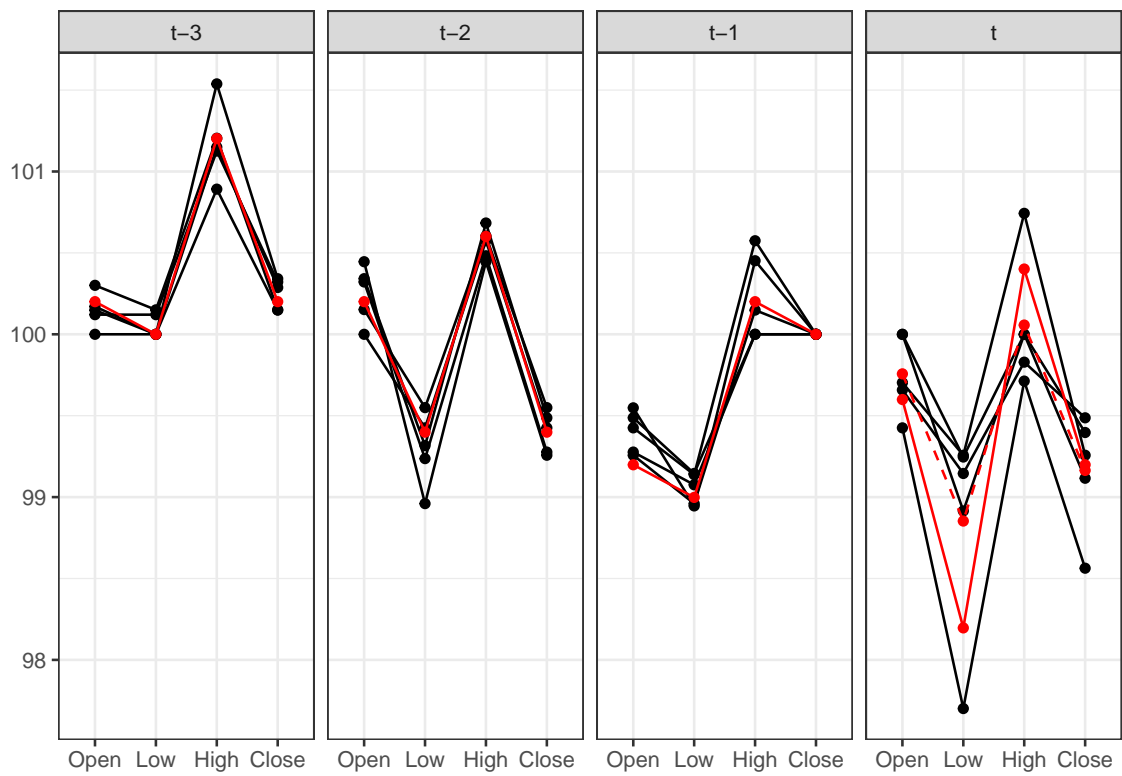


Abbildung 5: Exemplarische Kursprognose auf Basis nächster Nachbarn

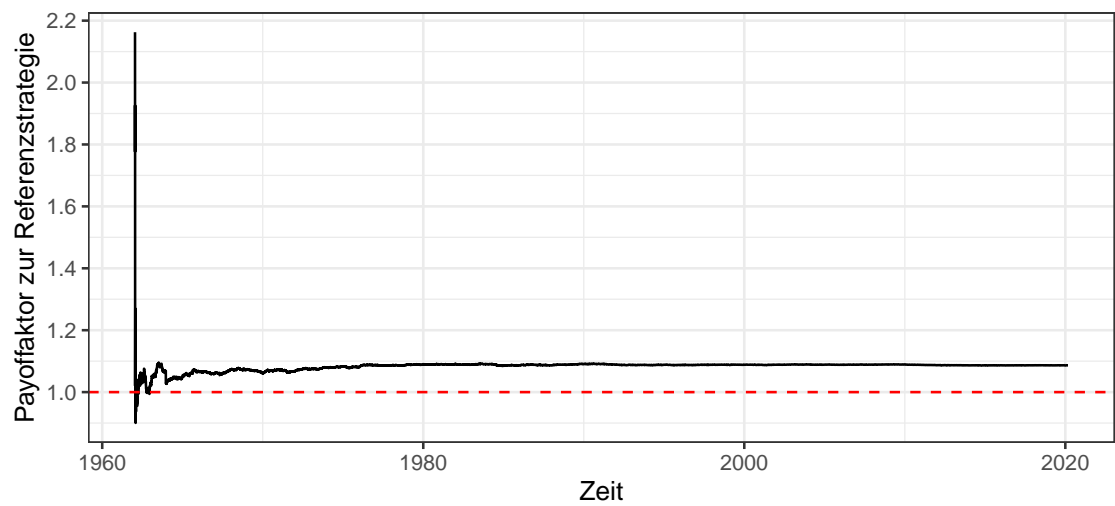


Abbildung 6: Entwicklung der Modellperformance über die Zeit

Eine zweite Möglichkeit, welche sich alternativ zur direktem Prognose der Preise anbietet, besteht darin, die Werte als Abweichung vom Eröffnungskurs zu modellieren. Hierzu wird für jeden Nachbarn die Differenz von Eröffnungs- und Tiefstpreis respektive Eröffnungs- und Höchstpreis berechnet. Die entsprechende Metrik (Mittelwert oder Median) wird dann auf diese Werte angewandt und auf den tatsächlichen Eröffnungspreis des aktuellen Tages appliziert. Dies hat den Vorteil, dass der bekannte Eröffnungspreis keiner Unsicherheit mehr unterliegt.

Tabelle 4 stellt die Ergebnisse aller Parametrisierungen ermittelt für den Testdatensatz einander gegenüber. Es zeigt sich, dass eine direkte Prognose der Preise der Vorhersage der Preisabweichungen vom Eröffnungspreis klar unterlegen ist. Bezüglich Distanzmass lässt sich kein eindeutiger Gewinner feststellen, beide Masse weisen ähnliche Performance aus. Ähnliches gilt für die Anzahl der berücksichtigten Nachbarn.

Allen Ergebnissen gemein ist hingegen, dass sie die Strategie der symmetrischen Preisauslenkungen nicht übertreffen können. Im Gegenteil fallen die Payoffs im Vergleich trotz deutlich höherem Berechnungsaufwand in der Tendenz schlechter aus. Der Payoff der Referenzstrategie wird aber weiter deutlich geschlagen. Die Hoffnung, dass mit der Individualisierung der einzelnen Einträge mehr kursrelevante Information extrahiert werden kann, bestätigt sich damit vorerst nicht. Ein Grund könnte die durch die Berechnungskomplexität beschränkte Begrenzung auf ein Zeitfenster von 3 vorangegangenen Tagen sein.

Tabelle 4: Überschussfaktoren im Vergleich zur Referenzstrategie

	Euklidisch		Manhattan	
	Mittelwert	Median	Mittelwert	Median
<b>5</b>	1.014	1.076	1.012	1.075
<b>20</b>	1.002	1.084	1.000	1.083
<b>50</b>	0.995	1.083	0.993	1.082

### 4.3 Neuronale Netzwerke

Als dritte Methode werden im vorliegenden Kapitel neuronale Netzwerke analysiert. Diese Methode erlaubt den Umgang mit sehr grossen Datenmengen, weshalb die Beschränkung auf ein sehr kurzes Zeitfenster hier nicht nötig ist. Die Architektur wird sehr einfach gehalten und besteht aus mehreren vollständig miteinander verknüpfter Schichten (Dense Layer). Das Ziel der Analyse bleibt das Gleiche wie in den Kapiteln zuvor: Es sollen basierend auf vergangenen Kursverläufen möglichst optimale Kauf- und Verkaufskurse für den laufenden Tag prognostiziert werden.

Wie bereits ausgeführt, ist der Payoff abhängig von der Höhe der Preisbewegung und der Wahrscheinlichkeit der Ausführung. Da der Payoff in quadratischer Form von der

Höhe der Kursbewegung abhängt, haben frühere Überlegungen bereits gezeigt, dass es allenfalls vorteilhaft sein könnte, eher breite Preisschranken zu setzen. Diese werden zwar weniger oft erreicht, werfen im Falle der Ausführung aber einen umso höheren Payoff ab. Ziel ist es daher, nicht nur Punktprognosen für die Preisextreme des Tages zu machen, sondern auch Erkenntnisse über deren Verteilungen zu gewinnen. Sind diese bekannt, können unter Berücksichtigung der Eintretenswahrscheinlichkeiten der jeweiligen Preisentwicklungen die optimalen Kauf- und Verkaufsschranken eruiert werden.

#### **4.3.1 Diskretisierung**

Zur Modellierung der Verteilung werden die Tiefst-, Höchst- und Schlusspreise in einem ersten Schritt diskretisiert. Für jeden Preisbereich [Bucket] lässt sich mit dem Modell später eine Eintretenswahrscheinlichkeit ermitteln. Zu beachten gilt es hierbei, dass die einzelnen Buckets möglichst gleich viele Werte enthalten. Ist dies nicht der Fall, bestehen für den Algorithmus Anreize, ein Element dem grössten Bucket zuzuordnen. Im vorliegenden Fall werden zwei Einteilungsverfahren verfolgt:

##### **1. Unabhängige Modellierung von Low, High und Close Preisen**

Eine erste Möglichkeit besteht darin, die Diskretisierung von Tiefst-, Höchst- und Schlusspreisen unabhängig voneinander zu gestalten. Dies hat den Nachteil, dass allenfalls wertvolle Information verloren geht. Dies zeigt sich insbesondere dadurch, dass Bucketkombinationen entstehen, welche in Realität nicht möglich sind. Beispielsweise sind dies Kombinationen, bei denen der Tiefstpreis höher ausfällt als der Höchstpreis.

Der Vorteil dieses Vorgehens liegt andererseits darin, dass die Ermittlung gleich grosser Buckets mittels Quantilbildung sehr einfach möglich ist. Zudem lässt sich das Problem bei Annahme von Unabhängigkeit in drei kleinere Klassifikationsprobleme aufteilen. Werden beispielsweise sowohl Tiefst-, Höchst- und Schlusspreise mit jeweils 30 Buckets modelliert, resultieren drei Klassifikationsprobleme à 30 Klassen. Kombiniert man diese, resultieren  $27'000 (= 30^3)$  Preisszenarien, wobei sich die Wahrscheinlichkeit für jedes dieser Szenarien als Multiplikation der einzelnen Preiswahrscheinlichkeiten ergibt.

##### **2. Abhängige Modellierung von Low, High und Close Preisen**

Eine zweite Möglichkeit besteht darin, die Diskretisierung mit Annahme einer Abhängigkeit der einzelnen Tagespreise vorzunehmen. Die Diskretisierung unter dem Ziel möglichst gleich grosser Buckets gestaltet sich dabei etwas schwieriger. Wir verwenden dazu den Ansatz, welcher zuerst die Tiefstpreise in gleich grosse Buckets aufteilt. Für jedes dieser Buckets werden danach die darin enthaltenen Höchstkurse in gleich grosse Buckets aufgeteilt. Die resultierenden Buckets werden danach wiederum in möglichst gleich grosse Buckets bezüglich Schlusspreisen aufgeteilt. Anders als im unabhängigen Fall sind die Bucket-Grenzen damit nicht immer gleich. Das Klassifikationsproblem lässt auch nicht mehr auf kleinere Modelle aufteilen. Alle  $27'000$  Szenarien müssen damit in einem grösseren Modell auf einmal bearbeitet werden. Der Vorteil dieser Methode liegt darin, dass eine Abhängigkeit

der Preise ökonomisch plausibler ist und auch unmögliche Szenarien nicht mehr vorkommen.

#### 4.3.2 Architektur

Neuronale Netze haben sich insbesondere im Bereich der Computer Vision - beispielsweise zur Klassifikation von Bildern - als sehr leistungsfähig herausgestellt (vgl. Krizhevsky et al., 2012). Diese Probleme zeichnen sich dadurch aus, dass mit der Verwendung von Pixel-Daten sehr grosse Datenmengen verarbeitet werden müssen. Im vorliegenden Fall sind die Datenmengen deutlich kleiner. Aus diesem Grund und aus Überlegungen der Einfachheit entscheiden wir uns daher für eine einfache Architektur mit zwei versteckten Dense Layer mit jeweils 512 Knoten. Diverse Tests zur Erhöhung der Knotenanzahl oder dem Beifügen weiterer Layer haben nicht zu wesentlich andern Ergebnissen geführt. Neben der Anzahl Layer stellt sich zudem die Frage nach der geeigneten Abbildung des Output Layers. Hierbei werden zwei Vorgehensweisen untersucht.

##### 1. Klassische Klassifikation

Eine erste Möglichkeit besteht darin, die Ordinalität der Klassen zu vernachlässigen. Eine solche Vernachlässigung macht insbesondere dann Sinn, wenn die einzelnen Klassen in keiner Abhängigkeit zueinander stehen. Wiederum bietet sich der Vergleich mit der Bildklassifikation an - beispielsweise der Klassifikation des Bildes einer Katze. Es lässt sich argumentieren, dass es bei einer Fehlklassifikation keine Rolle spielt, ob das Bild als Auto oder als Apfel erkannt wurde. Keines der beiden ist "weniger" oder "mehr" richtig, beide sind schlicht falsch. Für diese Art der Klassifikation bietet sich eine Verlustfunktion der Art "Categorical Crossentropy" und eine Aktivierung des Outputlayers mittels "Softmax"-Funktion an.

##### 2. Ordinale Klassifikation

Im vorliegenden Fall - insbesondere bei unabhängiger Klassifikation von Tiefst-, Höchst- und Schlusspreisen - lassen sich die Buckets in eine logische Reihenfolge bringen. Wird nun ein Wert anstatt in Bucket 10 fälschlicherweise in Bucket 9 klassifiziert, scheint dies der kleinere Fehler zu sein, als wenn die Klassifikation in Klasse 1 erfolgt wäre. Eine Möglichkeit, diese Art von Klassifikationen in neuronalen Netzen zu modellieren, zeigen Frank (2001). Grob besteht die Idee darin, die Wahrscheinlichkeit der aktuellen Klasse nicht direkt, sondern als kumulierte Wahrscheinlichkeit zu modellieren. Die Wahrscheinlichkeit einer spezifischen Klasse lässt sich dann als Differenz der kumulierten Wahrscheinlichkeiten benachbarter Klassen berechnen. Zu berücksichtigen gilt es hierbei, dass die kumulative Wahrscheinlichkeit in der Theorie nicht sinken kann. Dies ist durch das Modell aber nicht garantiert. Wir lösen dieses Problem, indem für die Auswertung jeweils das Minimum der aktuellen kumulierten Wahrscheinlichkeit und der Vorhergehenden verwendet wird. In ihrer Architektur unterscheiden sich diese Art der Modelle durch eine andere Verlustfunktion (Binary Crossentropy), eine andere Aktivierungsfunktion (Sigmoid) des Output Layers sowie eine etwas anderen Kodierung

der Labels.

### 4.3.3 Ergebnisse

Wie bereits erwähnt werden alle Modelle mit jeweils 30 Buckets im Falle unabhängig modellierter Preise, respektive 27'000 Preisszenarien im Falle abhängiger Preise berechnet. Ebenfalls allen Modellen gemein ist, dass eine Batch-Grösse von 512 und ein Training über 30 Epochen gewählt wird. Ferner werden als Features alle vier Preiskennzahlen der letzten 10 Tage plus der Eröffnungskurs des aktuellen Tages verwendet. Jedes dieser Features wird vor dem Training skaliert.<sup>4</sup> Das eigentliche Training erfolgt auf 80% des Trainingssets, 20% der Trainingsdaten dienen der Validierung.

#### 4.3.3.1 Unabhängige Modelle

Während des Trainings der Netze unabhängiger Preise zeigt sich der in Abbildung 7 dargestellte Lernfortschritt. Als Genauigkeit wird hierbei der Anteil richtiger Klassifizierungen angegeben. Folgende Aussagen lassen sich aus der Darstellung gewinnen:

- Die Genauigkeit richtig zugeordneter Klassen liegt deutlich über derjenigen einer zufälligen Zuteilung von 3.3% (1/30).
- Die Genauigkeit der Prognose für Tiefst- und Höchstkurs ist deutlich höher als diejenige des Schlusskurses.
- Über den Trainingsverlauf nimmt die Genauigkeit mit abnehmender Geschwindigkeit zu. Dies gilt sowohl für die Trainings- wie auch die Validierungsdaten. Ein Overfitting ist im vorliegenden Fall nicht auszumachen.

Die trainierten Modelle lassen sich danach zur Prognose der Wahrscheinlichkeitsverteilungen der Daten im Testset heranziehen. Für einzelne Beobachtungen lassen sich diese einfach visualisieren. Abbildung 8 zeigt die prognostizierten Verteilungen zweier exemplarischer Einträge. Diese unterscheiden sich deutlich. Während für ersteren Eintrag ein wenig volatiler Kursverlauf prognostiziert wird, erwartet das Modell im zweiten Fall eine deutlich volatilere Entwicklung.

Tatsächlich unterscheiden sich die realisierten Tiefts- und Höchstkurse, wenn auch nicht ganz so deutlich wie dies vom Modell prognostiziert. Die entsprechenden Realisierungen sind 99.37 und 100.83 für das erste und 98.75 und 101.5 für das zweite Beispiel.

Um den Payoff des ganzen Testsets berechnen zu können, müssen aus den geschätzten Verteilungen die optimalen Kauf- und Verkaufsschranken ermittelt werden. Eine erste Möglichkeit besteht darin, die Kauf- und Verkaufsschranken als Tiefst- respektive Höchstpreis desjenigen Buckets vorauszusagen, für welches das Modell die höchste

---

<sup>4</sup>Im Detail erfolgt die Skalierung auf Basis des Mittelwertes und Standardabweichung jedes Features des Trainingssets.

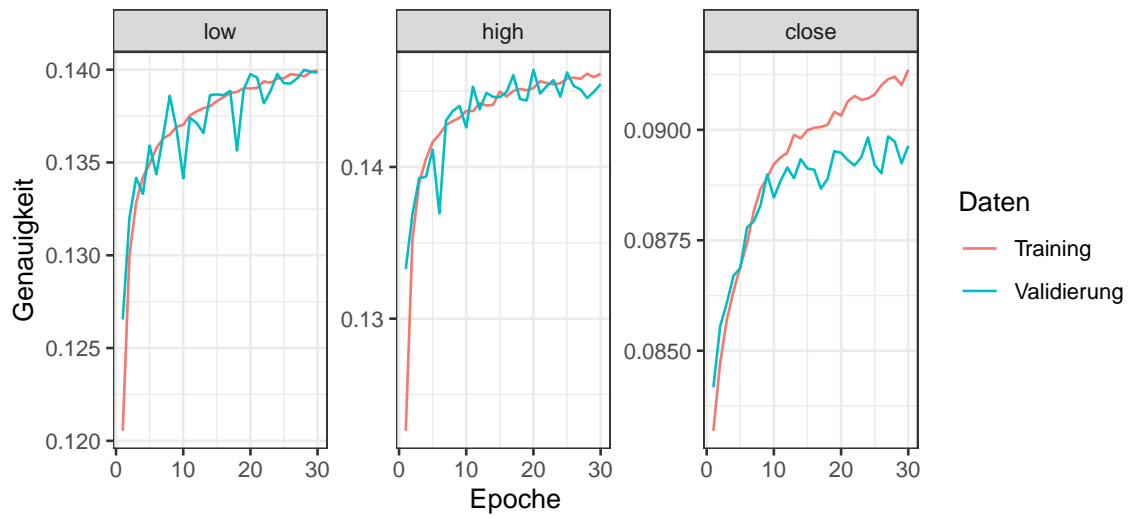


Abbildung 7: Trainingsfortschritt im Falle unabhängiger Preise

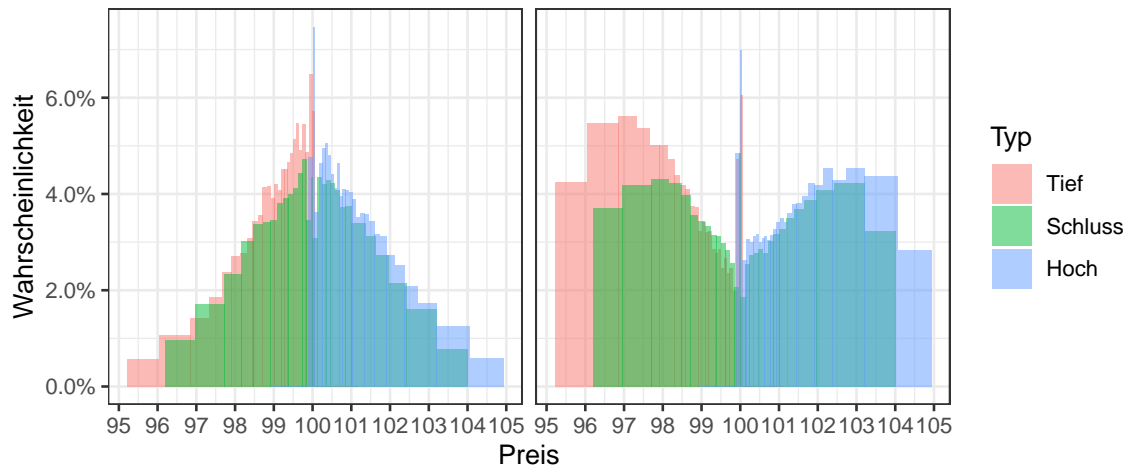


Abbildung 8: Exemplarische Verteilung der vorausgesagten Preise ohne explizite Modellierung der Ordinalität

Eintretenswahrscheinlichkeit prognostiziert.<sup>5</sup>

Mit Hilfe der so ermittelten Schranken lässt sich wie bei den vorangegangenen Methoden der Payoff des Testsets ermitteln und ins Verhältnis zur Referenzstrategie setzen. Es resultiert ein Überschusspayoff von 9.8%. Bereits in dieser einfachen Form ist das gelernte Modell damit ähnlich gut, wie das Modell basierend auf symmetrischen Abweichungen vom aktuellen Eröffnungskurs.

Während der Konzeption des Modelles wurde grosser Wert darauf gelegt, auch die Verteilung der Preise zu prognostizieren. Lediglich das wahrscheinlichste Szenario für die Prognose der Preisschranken zu verwenden, greift damit etwas kurz. Tatsächlich erlauben es die vorhandenen Werte nun auch, den Payoff verschiedener Kauf- und Verkaufsschranken für jedes der Preisszenarien zu berechnen und mit der jeweiligen Wahrscheinlichkeit zu gewichten. Als optimale Strategie lässt sich dann diejenige mit dem höchsten erwarteten Payoff auswählen.

Wiederum lohnt sich dabei erst ein Blick auf die Berechnungskomplexität des Problems: In der vorliegenden Analyse wurden je Preistyp 30 Buckets verwendet. Dies resultiert in 27'000 möglichen Preisszenarien. Diese können für jeden Eintrag des Testsets (rund 1'000'000 Einträge) ermittelt werden. Für jedes dieser Preisszenarien sollen wiederum verschiedene Paare von Kauf- und Verkaufsschranken getestet werden. Orientiert man sich dabei an einer ähnlichen Granularität wie bei den Preisen, resultieren 900 Szenarien für die Schranken (je 30 Werte für die Kauf- und Verkaufsschranke). Damit müssen zur kompletten Evaluation  $27'000 \times 1'000'000 \times 900$  Payoffs berechnet werden. Dies ist mit Hilfe der vorgestellten Cloud-Infrastruktur und Tools nicht innerhalb kurzer Zeit möglich.

Zur Reduktion der Komplexität lässt sich aber ausnützen, dass nicht alle Szenarien von gleicher Bedeutung sind. Während die Verwendung des häufigsten Szenarios und die Verwendung aller Szenarien die beiden Extrempositionen bilden, ist auch die Verwendung einiger wichtiger Preis- und Schrankenszenarien denkbar. Konkret lohnt es sich, diejenigen Szenarien auszuwählen, welche die höchsten Eintretenswahrscheinlichkeiten aufweisen. Dabei hat es sich bewährt, diese Grenze als Quantil der jeweiligen Wahrscheinlichkeiten zu wählen. Damit können nur sehr wenige, dafür wichtige Szenarien berücksichtigt werden. Die Berechnungskomplexität lässt sich damit deutlich senken. Diese Vorgehensweise hat zudem den Vorteil, dass mit einer Reduzierung des Quantils auch sehr einfach mehr Werte einbezogen werden können, sollte dies gewünscht werden. Ferner werden auch die Schrankenszenarien sehr stark reduziert, indem als Kauf- und Verkaufspreise nur die Tiefst- und Höchstwerte der betrachteten Preisszenarien berechnet werden.

Das beschriebene Vorgehen ist sowohl für unabhängige wie später auch für abhängige Modelle möglich. Bei den unabhängigen Modellen gibt es ferner zu beachten, dass

---

<sup>5</sup>Da ein Bucket durch untere und obere Grenze bestimmt ist, verwenden wir den Mittelwert von oberer und unterer Grenze als Vorhersagewert. Ist eine der Grenzen nicht finit, wird die andere Grenze als Vorhersagewert verwendet.

nicht mögliche Szenarien (beispielsweise prognostizierter Höchstpreis < prognostizierter Tiefstpreis) entfernt, respektive deren prognostizierte Wahrscheinlichkeiten vor der Auswertung auf 0 gesetzt werden. Bei den Modellen mit voneinander abhängigen Preisen treten solche Szenarien nicht auf.

Bezieht man die Buckets mit den 0.1% höchsten Eintretenswahrscheinlichkeiten (99.9% Quantil) in die Auswertung mit ein, resultiert ein Überschusspayoff von 12% gegenüber der Referenzstrategie. Durch Berücksichtigung (eines Teils) der geschätzten Verteilung kann die Modell-Performance damit noch einmal um 2.2 Prozentpunkte gesteigert werden und übertrifft damit die Performance früherer Modelle.

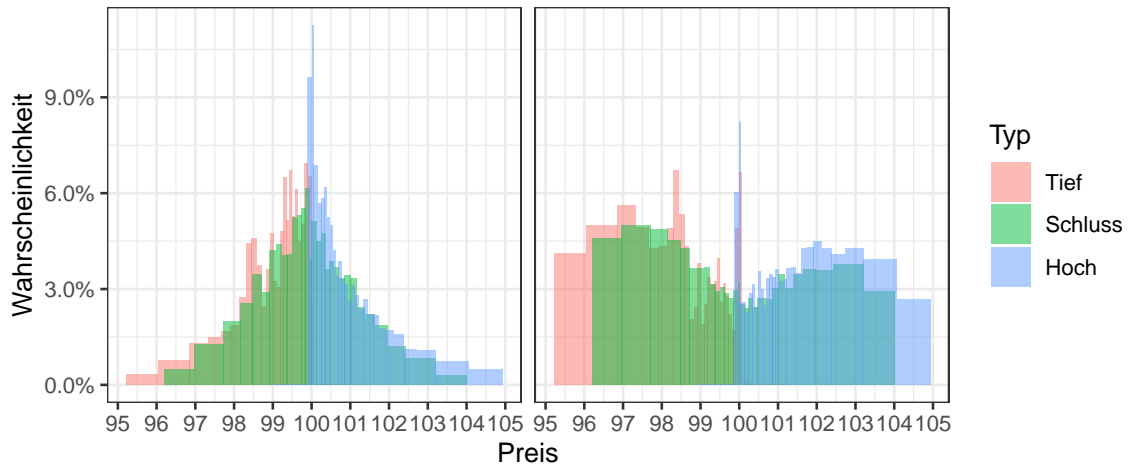


Abbildung 9: Exemplarische Verteilung der vorausgesagten Preise mit expliziter Modellierung der Ordinalität

Führt man die gleichen Analysen auch für das Modell durch, welches die Ordinalität der Klassen explizit modelliert, ergeben sich ähnliche Ergebnisse. Wie in Abbildung 9 ersichtlich, weisen die beiden exemplarischen Einträge im Testdatensatz auch bei diesem Modell vergleichbare Preisverteilungen auf. Es scheint, als ob eine explizite Modellierung der Ordinalität nicht unbedingt nötig ist. Die Verteilung scheint auch ohne explizite Modellierung richtig gelernt worden zu sein.

Der Komplettheit halber seien die Überschusspayoffs des ordinalen Modelles an dieser Stelle dennoch aufgeführt. Diese betragen bei der Berücksichtigung des Buckets mit höchster Wahrscheinlichkeit 10.4% und bei Berücksichtigung der 0.1% grössten Wahrscheinlichkeiten 12.5%. Beide Werte sind damit etwas besser als bei der Modellierung ohne Ordinalität.

#### 4.3.3.2 Abhängige Modelle

Die meisten Erkenntnisse aus der Analyse der unabhängigen Modelle lassen sich auch auf die abhängigen Modelle übertragen. Ein Unterschied liegt allerdings darin, dass sich



jedes der 27'000 Buckets im abhängigen Fall nicht nur auf den Bereich eines Preises, sondern auf den Bereich aller der drei Preise für Tiefst-, Höchst- und Schlusskurs gleichzeitig bezieht. Die Bildung einer Reihenfolge der Buckets für eine ordinale Modellierung sind damit nicht mehr gegeben. Ein weiterer Unterschied ergibt sich bei der Berechnungsdauer des Modelles. Diese erhöht sich im Falle des abhängigen Modelles deutlich und es empfiehlt sich die Berechnung auf einer oder mehrerer GPUs, um die Berechnungsdauer zu verkürzen.

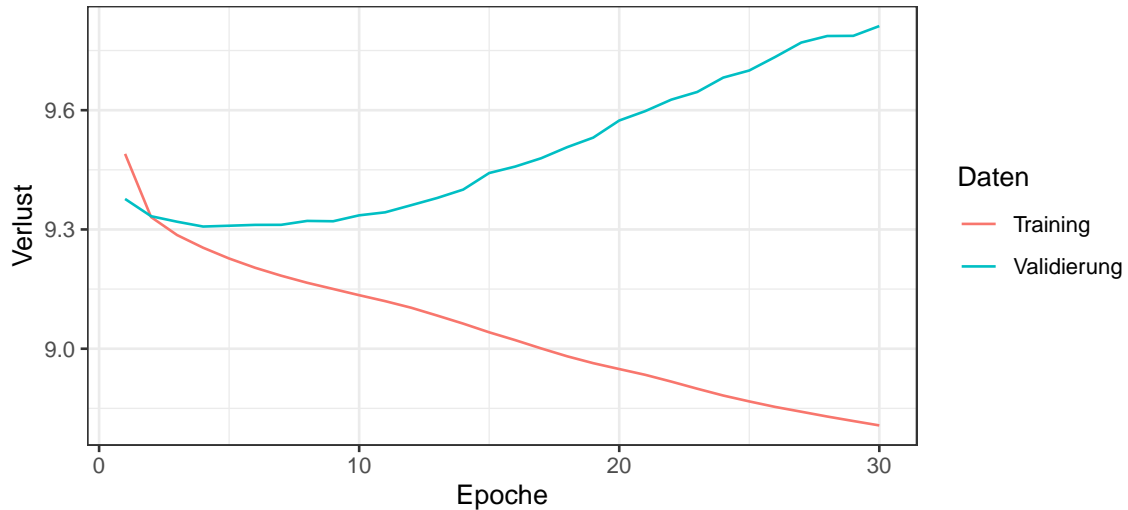


Abbildung 10: Trainingsfortschritt im Falle abhängiger Preise

Wie in Abbildung 10 ersichtlich, zeigt sich ein weiterer Unterschied darin, dass es während des Trainings des abhängigen Modelles innerhalb der verwendeten 30 Epochen zu einem Overfitting kommt. Dies zeigt sich dadurch, dass sich der Verlust des Validierungsset nach Epoche 5 wieder deutlich erhöht. Wir entscheiden uns darum dafür, das Modell aus Epoche 5 zu verwenden.

Für dieses lassen sich die gleichen Auswertungen wie zuvor durchführen. Wiederum lässt sich zum Vergleich mit den andern Modellen der Überschusspayoff im Vergleich mit der Referenzstrategie ermitteln. Bei Verwendung des Buckets mit höchster Eintretenswahrscheinlichkeit liegt dieser bei 11.6% und vermag vorherige Modelle zu übertreffen.

Werden wiederum gar die Buckets mit höchsten 0.1% Eintretenswahrscheinlichkeiten beigezogen, resultiert gar ein Überschusspayoff von 11.6%. Es handelt sich damit innerhalb der analysierten Modelle um dasjenige Modell mit der besten Performance.

## 5 Fazit und Ausblick

Beinahe alle Analysen zeigen, dass mittels öffentlich verfügbarer historischer Kursdaten Strategien gefunden werden können, welche den Payoff der Referenzstrategie übertreffen. Während die Referenzstrategie Preisfluktuationen innerhalb des Tages nicht ausnützt, können alternative Strategien davon profitieren.

Bereits mittels Festlegung der Preisschranken als symmetrische Auslenkungen vom aktuellen Eröffnungskurs lässt sich eine Überperformance von rund 8% erreichen. Es kann zudem gezeigt werden, dass die Volatilität der vergangenen 10 Tage einen erklärenden Einfluss auf die Volatilität des aktuellen Tages hat. Dies lässt sich dadurch erklären, dass Aktienpreise stark von neuen Informationen beeinflusst sind. Da sich natürlicherweise Phasen mit mehr Informationen (beispielsweise Dividenden-Saison, Krisen) und ruhigere Phasen (beispielsweise Ferienzeit) abwechseln, widerspiegelt sich dies auch in Phasen höherer und tieferer Volatilität im Markt. Berücksichtigt man dies durch die Einteilung der Daten in eine Gruppe tieferer und höherer Volatilität, lässt sich der Überschusspayoff auf rund 9% steigern.

Dass die Kursentwicklung der unmittelbaren Vergangenheit einen erklärenden Einfluss auf die Höhe der Bewegungen des nächsten Tages zu haben scheint, zeigt auch bei der Analyse mittels nächster Nachbarn. Es zeigt sich, dass mit dem Einbezug von immer mehr Vergleichskursen die Überschussperformance zunimmt. Dieser Effekt schwächt sich über die Zeit ab und resultiert in einer Überschussperformance vergleichbar mit der Strategie symmetrischer Auslenkung. Erwähnenswert ist dabei, dass diejenigen Modelle deutlich besser ausfallen, welche nicht den Preis, sondern die Auslenkung vom aktuellen Eröffnungspreis prognostizieren. Auf der anderen Seite scheinen weder die Anzahl verwendeter Nachbarn (5, 20 oder 50) noch das verwendete Distanzmass (euklidische oder Manhattan Distanz) einen grossen Einfluss auf die Performance der Modelle zu haben. Alle Parameterkombinationen führten zu ähnlichen Überschusskennzahlen.

Die besten Ergebnisse lassen sich bei Prognosen mittels neuronaler Netze beobachten. Als einzige der untersuchten Methoden modelliert diese die zukünftige Preisentwicklung nicht als Punktprognosen, sondern zieht deren Wahrscheinlichkeitsverteilungen in die Suche optimaler Kauf- und Verkaufsschranken mit ein. Bereits mit der Modellierung voneinander unabhängiger Tiefst-, Höchst- und Schlusskurse kann eine Überschussperformance erreicht werden, welche derjenigen der symmetrischen Auslenkung entspricht. Die Performance lässt sich etwas verbessern, wenn die Ordinalität der Preisbuckets im Modell explizit berücksichtigt wird. Das beste Ergebnis liefert allerdings das neuronale Netz, welches die Preise abhängig modelliert. Im vorliegenden Fall kann eine Performance erreicht werden, welche mehr als 15% über derjenigen der Referenzstrategie liegt.

Eine Übersicht über die Performance aller untersuchten Modelle gibt Tabelle 5, geordnet nach Höhe der erreichten (Über-) Performance.

Tabelle 5: Übersicht Überschussfaktoren im Vergleich zur Referenzstrategie

Modell	Performance	Bemerkungen
Nearest Neighbors	1.014	Bestes Modell Preisprognose euklidische Distanz (5 Nachbarn, Mittelwert)
Nearest Neighbors	1.015	Bestes Modell Preisprognose Manhattan Distanz (5 Nachbarn, Mittelwert)
Einfache Optimierung	1.083	Symmetrische Auslenkung, ohne Gruppierung
Nearest Neighbors	1.084	Bestes Modell Abweichungsprognose euklidische Distanz (20 Nachbarn, Mittelwert)
Nearest Neighbors	1.085	Bestes Modell Abweichungsprognose Manhattan Distanz (20 Nachbarn, Mittelwert)
Einfache Optimierung	1.096	Symmetrische Auslenkung, Gruppierung in Hoch- und Tiefvolatilitätsphasen
Neuronale Netze	1.098	Unabhängige Preismodellierung ohne Ordinalität, Bucket höchster Wahrscheinlichkeit
Neuronale Netze	1.104	Unabhängige Preismodellierung mit Ordinalität, Bucket höchster Wahrscheinlichkeit
Neuronale Netze	1.116	Abhängige Preismodellierung, Bucket höchster Wahrscheinlichkeit
Neuronale Netze	1.120	Unabhängige Preismodellierung ohne Ordinalität, 0.1% Buckets höchster Wahrscheinlichkeit
Neuronale Netze	1.125	Unabhängige Preismodellierung mit Ordinalität, 0.1% Buckets höchster Wahrscheinlichkeit
Neuronale Netze	1.155	Abhängige Preismodellierung, 0.1% Buckets höchster Wahrscheinlichkeit

Während mit vorliegenden Methoden und Analysen bereits Strategien gefunden werden konnten, welche die Referenzstrategie deutlich übertreffen, ist es wahrscheinlich, dass mit andern Methoden und Vorgehensweisen noch bessere Resultate erzielt werden könnten. So zeigte sich bei der Analyse mittels nächster Nachbarn, dass es vorteilhaft scheint, nicht die absoluten Preise, sondern die Auslenkungen vom aktuellen Eröffnungskurs zu prognostizieren. Für weiterführende Analysen könnte es daher interessant sein, die Auslenkungen (sowie deren Wahrscheinlichkeitsverteilungen) auch mit Hilfe neuro-

naler Netze zu prognostizieren.

Ferner liesse sich die Analyse auf weitere Methoden ausweiten. Denkbar wären beispielsweise auch der Einsatz des Random Forrest Algorithmus oder die Verwendung autoregressiver Modelle wie GARCH. Zweitere sind in der Finanzliteratur weit verbreitet, wenn es um die Modellierung von Volatilität geht (vgl. Osseiran, 2019). Weiter könnte sich auch die Analyse mit Long short-term memory Modellen (LSTM) lohnen. Es kann der Gruppe der Recurrent Neural Networks (RNN) zugeordnet werden und eignet sich zur Prognose von Zeitreihen wie sie im vorliegenden Fall vorliegen (vgl. Hochreiter and Schmidhuber, 1997).

## Literatur

- Altman, N. (1992). An introduction to kernel and nearest neighbor nonparametric regression. *The American Statistician*, 46(3):175–185.
- Amazon (2020). *Making an Amazon EBS volume available for use on Linux*. <https://docs.aws.amazon.com/AWSEC2/latest/UserGuide/ebs-using-volumes.html> [Abgerufen am: 27. Juni 2020].
- Asimas, M. (2018). Stock market betas for cyclical and defensive sectors: A practitioner’s perspective. *Philippine Management Review*, 25:99–114.
- Bentley, J. (1975). Multidimensional binary search trees used for associative searching. *Communications of the ACM*, 18(9):509–517.
- Blackrock (2020). *iShares MSCI World UCITS ETF: IWRD*. <https://www.ishares.com/ch/individual/en/products/251881/ishares-msci-world-ucits-etf-inc-fund> [Abgerufen am: 19. März 2020].
- Frank, E. und Hall, M. (2001). A simple approach to ordinal classification. volume 2167, pages 145–156.
- Hochreiter, S. and Schmidhuber, J. (1997). Long short-term memory. *Neural Computation*, 9(8):1735–1780.
- Krizhevsky, A., Sutskever, I., and Hinton, G. E. (2012). Imagenet classification with deep convolutional neural networks. In Pereira, F., Burges, C. J. C., Bottou, L., and Weinberger, K. Q., editors, *Advances in Neural Information Processing Systems 25*, pages 1097–1105. Curran Associates, Inc.
- Microsoft (2020). *Create a managed image of a generalized VM in Azure*. <https://docs.microsoft.com/en-us/azure/virtual-machines/windows/capture-image-resource> [Abgerufen am: 27. Juni 2020].
- Nestle (2020). *Dividendenzahlungen*. <https://www.nestle.com/investors/individual-shareholders/dividends/dividenden> [Abgerufen am: 21. März 2020].
- Osseiran, A. und Segonne, F. (2019). *Unperturbed by volatility: A Practitioner’s Guide to Risk*. first edition.

- RStudio (2020). *RStudio Server*. <https://docs.aws.amazon.com/AWSEC2/latest/UserGuide/ebs-using-volumes.html> [Abgerufen am: 27. Juni 2020].
- SP-Finance (2020). *Delta Hedging, Gamma and Dollar Gamma*. <http://sp-finance.e-monsite.com/pages/the-greeks/gamma/delta-hedging-gamma-and-dollar-gamma.html> [Abgerufen am: 29. April 2020].
- Tensorflow (2020). *GPU support*. <https://www.tensorflow.org/install/gpu> [Abgerufen am: 27. Juni 2020].
- Yahoo (2020). *Yahoo Finance*. <https://finance.yahoo.com/> [Abgerufen am: 21. März 2020].
- Yang, D. and Zhang, Q. (2000). Drift-independent volatility estimation based on high, low, open, and close prices. *The Journal of Business*, 73(3):477–492.