

Masterarbeit  
in der Angewandten Informatik  
Nr. AI-2021-MA-014

# **Generisches Clustern hoch-komplexer Produktdaten**

Hannes Dröse

Abgabedatum: 25.04.2022

Prof. Dr. Ines-Kerstin Rossak  
Dipl.-Inform. Robert Queck

## **Zusammenfassung**

Die Kurzfassung wird zumeist als letzter Abschnitt geschrieben. Sie soll auf einer Seite den Hintergrund bzw. die Motivation sowie die zentralen Ergebnisse der Arbeit zusammenfassen. Der Zweck dieses Texts ist es, einem Recherchierenden oder Informationssuchenden zu einem bestimmten Thema zu signalisieren, ob er in diesem Werk für ihn relevante Informationen finden wird: Lohnt es sich, die Arbeit zu bestellen oder zu kaufen? Was ist neu?

Die Kurzfassung ist das sichtbare Aushängeschild der Arbeit und dient der Aufnahme in Referenzdatenbanken, in Online-Literatur-Shops u. Ä. Schauen Sie sich die Abstracts in der Fachliteratur (etwa in Fachbüchern, am Anfang von Zeitschriftenartikeln, in Konferenz- Proceedings, in ACM- oder IEEE-Literaturdatenbanken, im OPAC der Bibliothek usw.) an, um ein Gefühl dafür zu entwickeln, was hineingehört (siehe Abschnitt 2.4 Materialsammlung, S. 2).

Was definitiv nicht hineingehört, sind Gliederungsübersichten, chronologische Arbeitsberichte u. dgl.

### **Abstract**

The abstract has to be provided in english as well.

# Inhaltsverzeichnis

<b>Abbildungsverzeichnis</b>	<b>V</b>
<b>Tabellenverzeichnis</b>	<b>VI</b>
<b>1 Einleitung</b>	<b>1</b>
1.1 Hintergrund . . . . .	1
1.2 Themenfindung . . . . .	1
1.3 Kernfrage und Ablauf . . . . .	2
<b>2 Clusteranalyse</b>	<b>4</b>
2.1 Begriff und Einordnung . . . . .	4
2.2 Distanz- und Ähnlichkeitsmaße . . . . .	5
2.2.1 Definition . . . . .	5
2.2.2 Numerische Attribute . . . . .	6
2.2.3 Kategorische Attribute . . . . .	8
2.2.4 String-Attribute . . . . .	11
2.2.5 Gemischte Attribute . . . . .	12
2.3 Clustering-Verfahren . . . . .	14
2.3.1 Partitionierendes Clustering . . . . .	14
2.3.2 Hierarchisches Clustering . . . . .	16
2.4 Cluster-Validität . . . . .	20
2.4.1 Überblick . . . . .	20
2.4.2 External Indices . . . . .	21
2.4.3 Internal Indices . . . . .	23
<b>3 Konzeption</b>	<b>26</b>
3.1 Überblick . . . . .	26
3.2 Datenquellen & -sets . . . . .	27
3.2.1 Akeneo-PIM . . . . .	27
3.2.2 Icecat . . . . .	32
3.2.3 Datenset . . . . .	32
3.3 Clustering . . . . .	33
3.3.1 Clustering-Verfahren . . . . .	33
3.3.2 Distanzfunktion . . . . .	34
3.4 Evaluation . . . . .	38
3.4.1 Kriterien . . . . .	38
3.4.2 Aspekte . . . . .	40
3.4.3 Vorgehen . . . . .	41
<b>4 Implementierung</b>	<b>42</b>
4.1 Überblick . . . . .	42

4.2	Datenset . . . . .	44
4.2.1	Attribute . . . . .	44
4.2.2	Produkte . . . . .	44
4.2.3	Korrekturen . . . . .	45
4.3	Clustering . . . . .	46
4.3.1	Überblick zu externen Libraries . . . . .	46
4.3.2	Clustering-Library . . . . .	47
4.3.3	Weitere Implementierungen . . . . .	49
4.4	Evaluation . . . . .	50
<b>5</b>	<b>Auswertung</b>	<b>52</b>
5.1	Datenset "Smartphone-Hüllen" . . . . .	52
5.1.1	Überblick . . . . .	52
5.1.2	Verarbeitung multi-kategorischer Attribute . . . . .	53
5.1.3	Attribut-Auswahl . . . . .	54
5.1.4	Attribut-Gewichtung . . . . .	62
5.2	Datenset "Smartphones" . . . . .	63
5.2.1	Überblick . . . . .	63
5.2.2	Verarbeitung multi-kategorischer Attribute . . . . .	63
5.2.3	Attribut-Auswahl . . . . .	65
5.2.4	Attribut-Gewichtung . . . . .	68
5.3	Kombiniertes Datenset . . . . .	69
5.3.1	Auswahl aus allen Attributen . . . . .	69
5.3.2	Verwendung gemeinsamer Attribute . . . . .	71
<b>6</b>	<b>Fazit und Ausblick</b>	<b>73</b>
	<b>Quellenverzeichnis</b>	<b>VII</b>
	<b>Anhang</b>	<b>X</b>
	<b>Selbstständigkeitserklärung</b>	<b>XI</b>

## Abbildungsverzeichnis

2.1	Bsp. eines Dendrograms . . . . .	17
3.1	Grober Architektur-Entwurf für den Praxisteil . . . . .	26
3.2	Schematische Darstellung der Funktionen von Akeneo-PIM [Aken22b] . . . . .	27
3.3	Akeneo-PIM Webfrontend bei der Bearbeitung eines Produktes . . . . .	28
4.1	Detaillierte Architektur der praktischen Umsetzung . . . . .	42
5.1	Stabilität der Clusterings nach Typen über alle Hierarchie-Ebenen . . . . .	56
5.2	Qualität der Clusterings nach Typen über alle Hierarchie-Ebenen . . . . .	57
5.3	Stabilität der Clusterings nach Erforderlichkeit über alle Hierarchie-Ebenen . . . . .	59
5.4	Qualität der Clusterings nach Erforderlichkeit über alle Hierarchie-Ebenen . . . . .	60
5.5	Stabilität und Qualität der ausgewählten relevanten Attribute im Vergleich zum bisher besten Verfahren . . . . .	61
5.6	Stabilität und Qualität des Clusterings der Smartphones nach menschlicher Auswahl . . . . .	68
5.7	Stabilität des Clustering des gesamten Datensets . . . . .	70
5.8	Qualität des Clustering des gesamten Datensets . . . . .	71

## Tabellenverzeichnis

2.1	Eigenschaften der Abstandfunktion $d$ . . . . .	5
2.2	Übersicht über die gängigen Maße aus der Minkowski-Familie [Cha07] . . . . .	6
2.3	Kontingenz der Datenpunkt-Paare in $Y$ und $Y'$ [Stei04] . . . . .	22
3.1	Attribut-Typen in Akeneo-PIM [Aken22h] . . . . .	31
3.2	Einteilung der Akeneo-Typen in übergeordnete Datenklassen . . . . .	34
3.3	Vorverarbeitung der numerischen Attribute in Akeneo . . . . .	35
4.1	Importierte Produkte nach Smartphone-Modell . . . . .	45
4.2	Anzahl an Attributen je Attribut-Klasse und Produktfamilie . . . . .	46
5.1	Übersicht zu den Attributen der Smartphone-Hüllen . . . . .	52
5.2	Clustering der Hüllen mit einem multi-kategorischen Attribut . . . . .	53
5.3	Clustering der Hüllen mit String-Attributen . . . . .	54
5.4	Clustering der Hüllen mit jeweils einem Attribut-Typ . . . . .	55
5.5	Clustering der Hüllen mit verschiedenen Kombinationen an Attribut-Typen . . . . .	55
5.6	Erkennung der gewünschten Cluster auf Basis der Hersteller . . . . .	58
5.7	Erkennung der gewünschten Cluster auf Basis der Hersteller nach Erforderlichkeit . . . . .	60
5.8	Ausgewählte Attribute für das Clustering der Hüllen . . . . .	61
5.9	Erkennung der gewünschten Cluster auf Basis der Hersteller für die menschliche Auswahl von Attributen . . . . .	61
5.10	Clustering der Hüllen mit verschiedenen Gewichtungen der Attribute . . . . .	62
5.11	Übersicht zu den Attributen der Smartphones . . . . .	63
5.12	Clustering der Smartphones mit den multi-kategorischen Attributen . . . . .	64
5.13	Clustering der Smartphones mit String-Attributen . . . . .	64
5.14	Clustering der Smartphones mit jeweils einem Attribut-Typ . . . . .	65
5.15	Clustering der Smartphones mit verschiedenen Kombinationen an Attribut-Typen . . . . .	65
5.16	Clustering der Smartphones mit erforderlichen und optionalen Attributen . . . . .	66
5.17	Ausgewählte Attribute für das Clustering der Smartphones . . . . .	67
5.18	Clustering der Smartphones mit verschiedenen Gewichtungen der Attribute . . . . .	67
5.19	Clustering der Smartphones mit verschiedenen Gewichtungen der Attribute . . . . .	68
5.20	Clustering des gesamten Datensets . . . . .	69
5.21	Gemeinsame Attribute von Hüllen und Smartphones . . . . .	71

# 1 Einleitung

## 1.1 Hintergrund

Diese Masterarbeit ist in Kooperation mit der adesso SE entstanden. adesso ist ein deutsches IT-Beratungs- und Dienstleistungsunternehmen, welches 1997 gegründet worden ist mit Hauptsitz in Dortmund. Seit der Gründung ist die Firma sehr kontinuierlich gewachsen. Mittlerweile sind über 5.800 Mitarbeiter an 44 Standorten in 10 verschiedenen europäischen Ländern hier beschäftigt.

Über die Jahre sind nicht nur die Mitarbeiterzahlen gestiegen, sondern auch die Menge an abgedeckten Branchen, in denen das Unternehmen tätig ist. In den letzten Jahren sind zunehmend Projekte im E-Commerce-Sektor umgesetzt worden. Mit Beginn von 2022 kümmert sich eine eigene Abteilung des Unternehmens explizit um das Thema E-Commerce und Retail.

In diesen Bereich fällt die Programmierung und Betreuung von Online-Shops sowie das umfangreiche Thema des Product-Information-Managements (PIM). Dabei geht es um das Verwalten und Aufbereiten von Produktdaten sowie die anschließende Verteilung dieser für verschiedene Anwendungen wie Warenhaltung, Marketing oder Bestellabwicklung. PIM-Systeme sitzen also zumeist im Zentrum der Unternehmens-Architektur, weshalb erhöhte Anforderungen an solche Systeme bestehen. adesso erwägt daher in Zukunft ein eigenes Product-Information-Management-System (PIM-System) zu entwickeln. In Vorbereitung dessen steht die Evaluierung der Machbarkeit verschiedener Ansätze und Ideen rund um das Product-Information-Management an. Dies gibt auch die thematische Eingrenzung für diese Masterarbeit.

## 1.2 Themenfindung

Die initiale Idee bestand darin zu überprüfen, ob es mögliche Anwendungen des Verfahrens der Clusteranalyse im Zusammenhang mit dem Product-Information-Management gibt. Beim Clustering handelt es sich um die Einteilung von Objekten in Gruppen (sog. Cluster), sodass sich die Objekte in der gleichen Gruppe ähnlicher sind als Objekte in den anderen Gruppen. [King15, Kap. 1.1 What Is a Cluster?]

In einem ersten Brainstorming sind verschiedene Anwendungen der Clusteranalyse diskutiert worden. Es folgte eine intensive Literaturrecherche zu den besprochenen Anwendungen, die im Folgenden kurz diskutiert werden.

Die erste Idee war das automatische Kategorisieren von Produkten. Zu dieser Anwendung gibt es kaum Literatur – lediglich einige hoch-experimentelle Ansätze. Z.B. nutzten Chen et



al. [ChZhYi19] ein neuronales Netz zum Vorschlagen von Produktkategorien zu Produkten bestehend aus Titel und Beschreibung.

Eine weitere Idee war die Nutzung der Clusteranalyse zur Entwicklung eines Produktempfehlungsalgorithmus. Zu diesem Thema gibt es ganze Reihe an Arbeiten:

- Oh und Kim [OhKi19] implementierten einen Empfehlungsalgorithmus für Cloud Computing-Angebote. Die verschiedenen Anbieter wurden nach den Anforderung der auszuführenden Applikation geclustert, um so das am besten passende Angebot zu finden.
- Cui [Cui21] verbesserte die Klick- und Kaufraten in einem Online-Shop durch die Kombination von Assoziationsregeln mit Fuzzy Clustering. Dadurch konnten passende Warenkörbe schneller identifiziert und vorgeschlagen werden.
- Zuletzt sei die Arbeit von Kumar et al. erwähnt [KRRT01]. Sie näherten sich mit einem möglichst allgemeinen mathematischen Modell an das Thema. Auf dieser Basis identifizierten sie Faktoren, die ein Empfehlungsalgorithmus erfüllen sollte. Werden diese befolgt, so können bereits mit wenigen Daten über das Nutzerverhalten effektive Empfehlungen gegeben werden. Das Clustern der Produkte beschleunigt diesen Prozess, da Erkenntnisse zu einem Produkt auf die gesamte Gruppe übertragbar sind.

Die letzte Idee beschäftigte sich mit der Suche von Produkten. Ein sehr spannendes Paper hierzu verfassten Kou und Lou [KoLo12]. Sie verbesserten die Klickraten einer Websuchmaschine durch die Nutzung von Clustering. Ihr Algorithmus nutzte die am meisten geklickten Webseiten zu jedem Suchbegriff als initiale Schwerpunkte für die Cluster. Anschließend sind die übrigen Webseiten rund um diese Schwerpunkte geclustert worden. Dadurch konnten neu hinzugekommene Seiten direkt in die Suche integriert werden. Außerdem erhöhte sich die Relevanz der gefundenen Suchergebnisse.

Davon abgesehen gibt es für diesen Bereich kaum Arbeiten, in denen Suchfunktionen mit Clustering kombiniert worden sind. Das liegt sicherlich daran, dass klassische probabilistische Suchalgorithmen (der bekannteste ist der BM25 [RoZa09]) sehr gute Ergebnisse liefern. Ansätze wie von Kou und Lou sind in dem Zusammenhang eher als experimentell anzusehen.

## 1.3 Kernfrage und Ablauf

Parallel zu der beschriebenen Recherche ist die Dokumentation eines typischen PIM-Systems (Akeneo-PIM) analysiert worden. Ziel war es zu verstehen, wie die Produktdaten in solchen System typischerweise vorliegen. Dies ist nötig, um einzuschätzen, ob und wie das Clustering der Produktdaten in solchen Systemen möglich ist.

Zum einen weisen die Produktdaten einen hohen Grad an Struktur auf. Die Attribute sind fest definiert. Umfangreiche Constraints sorgen für die Einhaltung des definierten Schemas. Zum anderen kommen sehr verschiedenartige Datentypen vor wie z.B. Textfelder, Einfach- und Mehrfachauswahl, numerische Daten mit verschiedenen Einheiten. Zudem sind viele Attribute lokalisierbar und weisen je nach Sprache andere Werte auf. Die klassische Clusteranalyse arbeitet allerdings nur mit numerischen Daten [King15, Kap. 1.2 Capturing the Clusters]. Somit war abzusehen, dass das Clustern selbst kein einfacher Prozess sein wird.

Dadurch verschob sich der Fokus der Arbeit. Bevor mögliche Anwendungen der Clusteranalyse evaluiert werden, stellt sich zuerst die Frage, ob so vielfältige Produktdaten überhaupt geclustert werden können. Die Kernfrage der Arbeit lautet also:

*Ist das effektive Clustern hoch-komplexer Produktdaten möglich – und wenn ja, wie?*

Diese Fragestellung war der Ausgangspunkt weiterer Recherchen, Experimente und Versuche. Sie werden in den folgenden Kapiteln erläutert.

*Kapitel 2* gibt einen Überblick über die wissenschaftlichen Grundlagen und Erkenntnisse des Themenfeldes.

Auf dieser Basis wird in *Kapitel 3* eine Konzeption dargelegt, wie das Clustern durchgeführt werden kann. Ebenso werden Versuche geplant, die zur Überprüfung des Konzeptes dienen.

*Kapitel 4* beschreibt die Umsetzung des dargelegten Konzeptes. Thema dabei sind die Implementierung nötiger Software-Komponenten, Tools und Techniken, die zur Überprüfung der Fragestellung angewendet worden sind.

Die Auswertung und Evaluation der Versuche erfolgt in *Kapitel 5*.

Im finalen *Kapitel 6* wird das Fazit gezogen, ob die Kernfrage beantwortet werden kann. Ebenso wird ein Ausblick für weitere Versuche und Fragestellungen in der Zukunft gegeben.

## 2 Clusteranalyse

### 2.1 Begriff und Einordnung

King definiert die *Clusteranalyse* als die “[...] Generierung eines Klassifizierungsschemas, welches Individuen in eine feste Anzahl an Gruppen einteilt, so dass sich die Individuen innerhalb einer Gruppe auf eine Art und Weise ähnlich sind und unähnlich denen in anderen Gruppen” [King15, Kap. 1.1 What Is a Cluster?]. Diese Gruppen werden auch als Cluster bezeichnet.

Die Objekte, welche es zu clustern gilt, werden in dieser Arbeit auch als *Datenpunkte* oder *Produkte* (da dies die Anwendung im Praxisteil ist) bezeichnet. Mathematisch werden sie i.d.R. mittels  $x$  definiert. Diese Produkte bestehen aus einer festen Menge an Attributen (z.B. Farbe, Gewicht etc.). Mathematisch ist so ein Datenpunkt als ein Vektor definiert und jedes Element im Vektor steht für die Wertausprägung eines spezifischen Attributes. Mittels Superskript werden spezifische Attribute eines Datenpunktes angesprochen.  $x^i$  bezeichnet also das  $i$ -te Attribut von  $x$ .

$$x = (a | a \text{ is attribute}) \quad (2.1)$$

Die Produkte oder Datenpunkte sind Teil eines *Datensets*  $X$ . Hierbei handelt es sich um eine simple Menge dieser Datenpunkte  $x \in X$ . Mittels Subskript werden einzelne Punkte des Sets angesprochen (z.B.  $x_1, x_2$  oder  $x_i$ ). Wenn nicht anders angegeben, gilt  $n = |X|$ .

Als *Cluster*  $C$  wird nun eine Teilgruppe aus dem Datenset bezeichnet:  $C \subset X$ . Allerdings können Cluster auch “hierarchisch” strukturiert sein. D.h. ein Cluster kann sowohl Datenpunkte als auch andere Cluster enthalten.

$$C = \{e | e = C_i \vee e \in X\} \quad (2.2)$$

Die *Menge aller Cluster* wird mit  $K = \{C_1, C_2, \dots\}$  bezeichnet. Dabei wird die Anzahl der Cluster mit  $k = |K|$  angegeben.

Schlussendlich gibt es noch das *Clustering-Ergebnis*  $Y$ . Dies ist ein Vektor der Länge  $n$ , welches jeden Datenpunkt im Set einem entsprechenden Cluster zuordnet.

$$Y = (l | l_i = \text{label for } x_i \in X) \quad (2.3)$$

Dieser Prozess des Clusterings ist eine Methode des *unüberwachten Lernens* (*unsupervised learning*) – einem Teilgebiet des maschinellen Lernens. Papp et al. schreiben dazu: “Machine Learning beschäftigt sich mit der Entwicklung von Methoden, die Modelle von Zusammenhängen aus Daten erlernen, anstatt sie *per Hand* zu implementieren” [PWMO19, Kap. 5 Statistik-Grundlagen]. Unüberwachtes Lernen bedeutet dabei, dass die verwendeten Daten nicht im Vorhinein gekennzeichnet sind (Unlabeled Data). Stattdessen werden Ähnlichkeiten und Muster in den Daten selbst gesucht ohne eine vorgegebene Zielgröße. Häufig dienen diese Analysen als erste Schritte der *Data Exploration*, aus denen im Anschluss neue Erkenntnisse und Anwendungen abgeleitet werden. [PWMO19, Kap. 5.2.3 Unüberwachtes Lernen]

## 2.2 Distanz- und Ähnlichkeitsmaße

### 2.2.1 Definition

Die Forderung, dass Objekte in gleichen Clustern sich “ähnlich” sein sollen und unähnlich zu den Objekten in anderen Clustern, muss in irgendeiner Form quantifiziert werden. Dies erfolgt über die Berechnung der “Nähe” (engl. proximity) der Objekte zueinander. Dazu werden sog. Abstands- bzw. Distanzmaße verwendet. [KaRo09, Kap. 1.2 Types of Data and How to Handle Them]

Mathematisch wird dieses Distanzmaß mittels der Funktion  $d(x_1, x_2)$  (engl. distance) definiert, welche die Distanz zwischen zwei Datenpunkten  $x_1$  und  $x_2$  als skalaren Wert zurückgibt. Zusätzlich geben Kaufmann und Rousseeuw folgende Eigenschaften für  $d$  an [KaRo09, Kap. 1.2.1 Interval-Scaled Variables]:

Tabelle 2.1: Eigenschaften der Abstandsfunktion  $d$

1.	$d(x_1, x_2) \geq 0$	Distanzen sind stets positiv
2.	$d(x_1, x_1) = 0$	zwei gleiche Objekte haben immer einen Abstand von 0
3.	$d(x_1, x_2) = d(x_2, x_1)$	die Distanzfunktion ist kommutativ bzw. symmetrisch
4.	$d(x_1, x_3) \leq d(x_1, x_2) + d(x_2, x_3)$	Distanzen geben stets den kürzesten Weg an

Anstatt des Abstandes kann alternativ auch die Ähnlichkeit zweier Objekte berechnet werden. Solche Ähnlichkeitsmaße  $s(x_1, x_2)$  (engl. similarity) sind häufig im Interval  $[0; 1]$  angegeben, wobei die 1 maximale Ähnlichkeit angibt. Ist nun eine entsprechende Distanzfunktion z.B. durch Normalisierung ebenfalls im Interval  $[0; 1]$  definiert, so können Distanzen und Ähnlichkeiten einfach ineinander überführt werden [KaRo09, Kap. 1.2.3 Similarities]:

$$d(x_1, x_2) = 1 - s(x_1, x_2) \quad (2.4)$$

Distanzen und Ähnlichkeiten sind dadurch beliebig austauschbar. Daher ist dieses Vorgehen stets empfehlenswert.

Es existieren eine Vielzahl an Distanz- und Ähnlichkeitsmaßen. Welche zur Anwendung kommen, hängt maßgeblich von den Attributen und vor allem den Attribut-Typen ab, aus denen die Datenpunkte bestehen. [KaRo09, Kap. 1.2 Types of Data and How to Handle Them]

### 2.2.2 Numerische Attribute

Numerische Attribute sind im Allgemeinen alle Arten von (rationale) Zahlen [KaRo09, Kap. 1.2 Types of Data and How to Handle Them] mit stetigen (engl. continuous) Werten [Huan98]. Es kann sich dabei sowohl um Intervall- als auch um Verhältnisskalen handeln (engl. interval and ratio data). [Bosl12, Kap. 1 Basic Concepts of Measurement]

Datenpunkte, die nur aus numerischen Attributen bestehen, sind die klassischste Form von Daten, mit denen Clusteranalyse durchgeführt wird. Die meisten Algorithmen und Verfahren sind damit speziell auf diesen Attribut-Typ ausgelegt. [King15, Kap. 1.2 Capturing the Clusters]

#### Minkowski-Familie

Der Abstand zwischen reinen numerischen Vektoren wird mittels Maßen aus der sog. Minkowski-Familie berechnet. Das älteste dieser Metriken ist der “euklidische Abstand” (auch pythagoreische Metrik genannt), welcher den Abstand zwischen zwei Punkten über eine gerade Linie zwischen diesen beiden bestimmt. Im 19. Jahrhundert verallgemeinerte Hermann Minkowski dieses Maß zu einer ganzen Familie. [Cha07]

Tabelle 2.2: Übersicht über die gängigen Maße aus der Minkowski-Familie [Cha07]

Name	$p$ -Norm	Formel
allgemeine Form		$d(x_1, x_2) = \sqrt[p]{\sum_{i=1}^n  x_1^i - x_2^i ^p}$
Manhattan-Abstand	$p = 1$	$d(x_1, x_2) = \sum_{i=1}^n  x_1^i - x_2^i $
euklidischer Abstand	$p = 2$	$d(x_1, x_2) = \sqrt{\sum_{i=1}^n  x_1^i - x_2^i ^2}$
Chebyshev-Abstand	$p = \infty$	$d(x_1, x_2) = \max  x_1^i - x_2^i $

Die allgemeine Form ist über den Ausdruck  $p$  parametrisiert. Die konkreten Vertreter der Familie kommen nun durch ein spezifisch gewähltes  $p$  zustande. Daher wird bei diesen Maßen auch von der sog.  $p$ -Norm gesprochen. Eine höhere  $p$ -Norm steht dabei im Allgemeinen für eine robustere bzw. eindeutigere Bestimmung des Abstandes. [King15, Kap. 12.3 Which Proximity Measure Should Be Used?]

Dies sind bei weitem nicht alle Arten von Maßen für numerische Attribute. Cha [Cha07] hat eine Vielzahl solcher Maße zusammengetragen, analysiert und miteinander verglichen. Dabei kam er zu folgenden Erkenntnissen:

Die meisten dieser Maße sind Abwandlungen eines Vertreters aus der Minkowski-Familie bzw. lassen sich auf einen solchen abbilden (z.B. basieren einige Maße auf der Pearson-Korrelation, welche ihrerseits wiederum auf dem euklidischen Abstand beruht). In seinen

anschließenden Versuchen zeigte er, dass Maße, die auf einander basieren, auch stets ähnliche Abstände liefern. [Cha07]

Daraus lässt sich ableiten, dass die Vertreter der Minkowski-Familie ausreichend sind, um den Abstand numerischer Vektoren zu bestimmen.

### Vorverarbeitung

Häufig macht eine Vorverarbeitung der numerischen Attribute Sinn, um verschiedene Arten von Problemen zu vermeiden. [KaRo09, Kap. 1.2.1 Interval-Scaled Variables]

**Logarithmische Attribute** Die Abstandsmaße der Minkowski-Familie gehen i.d.R. von linearen Verhältnissen der Zahlen zueinander aus (Punkte mit einem Abstand von 2 sind doppelt so weit entfernt, wie Punkte mit einem Abstand von 1). Es kann aber vorkommen, dass die vorliegenden Daten eigentlich einen logarithmischen Zusammenhang aufweisen (der Abstand von 10 zu 20 ist exakt gleichbedeutend mit dem Abstand von 100 zu 200). Damit die Abstandsmaße richtig arbeiten können, sollten solche Attribute vorher in eine lineare Abbildung überführt werden [KaRo09, Kap. 1.2.5 Nominal, Ordinal, and Ratio Variables]. Dies wird folgendermaßen bewerkstelligt:

$$x'^i = \log x^i \quad (2.5)$$

**Standardisierung** Weitere Probleme können entstehen, wenn die absoluten Werte in den verschiedenen Dimensionen der Vektoren stark voneinander abweichen. Angenommen das Datenset besteht aus zwei-dimensionalen Vektoren. Die Werte in der ersten Dimension liegen im Bereich  $[0; 1]$  und in der zweiten im Bereich  $[100; 200]$ . Dadurch würden die Unterschiede zwischen den Werten in der zweiten Dimension viel stärker ins Gewicht fallen, da hier die Differenzen zwischen den Werten bis zu 100 Mal höher ausfallen. Um eine Gleichgewichtung zu erzeugen, sollten diese Attribute jeweils auf die gleiche Art standardisiert werden. [KaRo09, Kap. 1.2.1 Interval-Scaled Variables]

Milligan und Cooper [MiCo88] haben eine Vielzahl solcher Methoden der Standardisierung analysiert und experimentell miteinander verglichen.

$$x'^i = \frac{x^i - \text{avg } X^i}{\sigma(X^i)} \quad (2.6)$$

Die Formel 2.6 zeigt die Standardisierung mittels des klassischen z-Wertes. Die auftretenden Werte werden dadurch auf die 0 zentriert und mit einer Varianz von 1 drumherum verteilt. Dieses Maß ist besonders anfällig für Outliers (stark von der Hauptmenge abweichende Werte). In Milligan und Coopers Versuchen schnitt es daher eher mittelmäßig ab. [MiCo88]

$$x'^i = \frac{x^i - \text{avg } X^i}{\text{mad } (X^i)} \quad (2.7)$$

$$\text{mad}(X^i) = \frac{1}{n} \sum_j |x_j^i - \text{avg } X^i| \quad (2.8)$$

Kaufmann und Rousseeuw empfehlen eine modifizierte Form des z-Wertes nach Hartigan [Hart75]. Statt durch die Standardabweichung  $\sigma(X^i)$  zu teilen, wird durch die mittlere absolute Abweichung (engl. *mean absolute deviation*)  $\text{mad}(X^i)$  dividiert. Dieses Vorgehen soll den Einfluss von Outliern dämpfen. [KaRo09, Kap. 1.2.1 Interval-Scaled Variables]

$$x'^i = \frac{x^i - \min X^i}{\max X^i - \min X^i} \quad (2.9)$$

Eine weitere Methode ist die Skalierung aller Werte auf das Intervall  $[0; 1]$ . Obwohl Outliers bei dieser Methode ebenfalls die restlichen Werte in einen kleineren Bereich komprimieren, war dieser Ansatz in Milligan und Coopers Versuchen äußerst robust und lieferte über alle Versuche akzeptable Ergebnisse. [MiCo88]

Kaufmann und Rousseeuw geben zu bedenken, dass die unterschiedlichen Gewichtungen der Werte echte Zusammenhänge der realen Welt widerspiegeln könnten. Durch Standardisierung gehen diese entsprechend verloren. Weiterhin ist sogar denkbar, bewusst einige Attribute stärker zu gewichten als anderen (indem sie mit entsprechenden Gewichten multipliziert werden). Dies sind allerdings eher speziellere Fälle, in denen im Vorfeld bereits Domänenwissen zum Datenset vorliegen muss. [KaRo09, Kap. 1.2.1 Interval-Scaled Variables]

### 2.2.3 Kategorische Attribute

Kategorische Attribute bilden die zweite große Gruppe von Attribut-Typen. Sie zeichnen sich dadurch aus, dass als Wertausprägungen Labels verwendet werden, die verschiedene Kategorien repräsentieren. Diese Labels können in Form von Zeichenketten (z.B. “red”, “green”, “blue”), Bool-Werten (*true/false*, Ja/Nein, 0/1) oder auch diskreten Ziffern auftreten. Es ist eine weitere Unterscheidung in die zwei Teilgruppen ordinale und nominale Attribute möglich. [Bos12, Kap. 5 Categorical Data]

#### Ordinale Attribute

Lassen sich die vorkommenden Labels eines Attributes in eine sinnvolle Reihenfolge bringen (z.B. “XS”, “S”, “M”, “L”, “XL”), so werden sie als *ordinal* bezeichnet. Wichtig dabei ist, dass nur eine sinnvolle Reihenfolge besteht. Eine Aussage über die Intervalle zwischen den Labels (“XS” zu “S” ist genauso weit wie “M” zu “L”) oder über deren quantitativen Verhältnisse ( $3 \cdot \text{“XS”} = 2 \cdot \text{“S”}$ ) macht aber keinen Sinn. [Bos12, Kap. 1 Basic Concepts of Measurement]

Für die Berechnung des Abstandes gibt es grundsätzlich zwei Möglichkeiten: Zum einen können ordinale Attribute genauso wie nominale verarbeitet werden (siehe nächster Abschnitt). Zum anderen kann die Reihenfolge der Labels verwendet werden, um die Labels in numerische Werte umzuwandeln. Anschließend kann der Abstand mittels der Maße für numerische Attribute berechnet werden. [KaRo09, Kap. 1.2.5 Nominal, Ordinal, and Ratio Variables]

Die Umwandlung erfolgt dabei so, dass die Labels entsprechend ihrer natürlichen Reihenfolge beginnend mit 1 nummeriert werden. Der finale numerische Wert berechnet sich dann wie folgt:

$$x'^i = \frac{x^i - 1}{|\{x \in X^i\}| - 1} \quad (2.10)$$

$|\{x \in X^i\}|$  ist dabei die Menge an auftretenden Labels. Dadurch liegen alle Werte erneut im Intervall  $[0; 1]$ , welches in  $|\{x \in X^i\}| - 1$  gleichmäßige Schritte unterteilt ist. [KaRo09, Kap. 1.2.5 Nominal, Ordinal, and Ratio Variables]

### Nominale Attribute

Die Verarbeitung von nominalen Attributen geschieht über die vorherige Umwandlung in sog. binäre Attribute. Diese Attribute sind dadurch gekennzeichnet, dass sie nur zwei verschiedene Werte annehmen können (i.d.R. 0/1 bzw. *false/true*) [KaRo09, Kap. 1.2.5 Nominal, Ordinal, and Ratio Variables]. Hier gilt es zwei Fälle zu unterscheiden:

Kommen in den Labels eines Attributs maximal zwei verschiedene Werte vor (z.B. Ja/Nein, schwarz/weiß etc.), so werden diese in ein einzelnes binäres Attribut umgewandelt. Solche Attribute werden auch als *symmetrische* binäre Attribute bezeichnet. [KaRo09, Kap. 1.2.4 Binary Variables]

Bei mehr als zwei Wertausprägungen gibt es hingegen wiederum zwei Möglichkeiten:

- Zum einen können die vorkommenden Labels auf genau zwei verschiedene Wertausprägungen komprimiert werden, sodass wieder ein einzelnes binäres Attribut verwendet werden kann. Dieser Vorgang geht aber mit einem Informationsverlust einher. [KaRo09, Kap. 1.2.5 Nominal, Ordinal, and Ratio Variables]
- Zum anderen kann für jedes vorkommende Label ein eigenes binäres Attribut angelegt werden. Das Attribut, welches das tatsächlich vorkommende Label eines Datenpunktes repräsentiert, wird entsprechend auf *true* gesetzt und alle anderen auf *false*. Diese Umwandlung resultiert in sog. *asymmetrische* binäre Attribute. [KaRo09, Kap. 1.2.4 Binary Variables]

Kennzeichnend für die symmetrischen binäre Attribute ist, dass beide Wertausprägung eine konkrete Eigenschaft des Objektes darstellen (z.B. 0 = schwarz und 1 = weiß). Asymmetrische zeigen hingegen nur das Vorhanden- oder Nicht-Vorhandensein einer bestimmten Eigenschaft an und müssen stets im Kontext der gesamten Gruppe betrachtet werden. Für beide Arten gibt es jeweils eigene Distanzmaße. [KaRo09, Kap. 1.2.4 Binary Variables]



**Simple Matching** Das sog. Simple Matching ist für die Bewertung der Ähnlichkeit von Objekten mit ausschließlich symmetrischen binären Attributen geeignet. [KaRo09, Kap. 1.2.4 Binary Variables]. Es berechnet sich wie folgt:

$$s(x_1, x_2) = \frac{\sum_i^n s'(x_1^i, x_2^i)}{n} \quad (2.11)$$

$$s'(x_1^i, x_2^i) = \begin{cases} 1 & , x_1^i = x_2^i \\ 0 & , x_1^i \neq x_2^i \end{cases} \quad (2.12)$$

Es wird also die Anzahl an Attributen, in denen beide Datenpunkte den gleichen Wert aufweisen, durch die Gesamtzahl der Attribute von  $x_1$  und  $x_2$  ( $n$ ) geteilt. Es handelt sich damit um ein Ähnlichkeitsmaß im Intervall  $[0; 1]$ , wobei die 1 für perfekte Übereinstimmung steht. [kombiniert aus Huan98; und KaRo09, Kap. 1.2.5 Nominal, Ordinal, and Ratio Variables]

Wenn in der Implementierung die Labels der Datenpunkte direkt auf Gleichheit bzw. Ungleichheit überprüft werden können (also  $x_1^i = x_2^i$  und  $x_1^i \neq x_2^i$ ), so kann die vorherige Umwandlung in binäre Attribute auch entfallen. [KaRo09, Kap. 1.2.5 Nominal, Ordinal, and Ratio Variables]

Es gibt von diesem Verfahren eine Reihe von Abwandlungen, welche die Ausprägungen bestimmter Wertekombinationen gesondert gewichten. Alle diese Varianten basieren im Kern auf dem Simple Matching und liefern stets ähnliche Ergebnisse. [KaRo09, Kap. 1.2.4 Binary Variables]

**Jaccard-Koeffizient** Für die Bewertung der Ähnlichkeit von Objekten mit asymmetrischen binären Attributen eignet sich hingegen der Jaccard-Koeffizient besser [KaRo09, Kap. 1.2.4 Binary Variables]. Er berechnet sich wie folgt:

$$s(x_1, x_2) = \frac{|x_1 \cap x_2|}{|x_1 \cup x_2|} \quad (2.13)$$

Im Gegensatz zum Simple Matching werden hier alle Attribute, in denen beide Objekte den Wert *false* aufweisen, ignoriert. Die Übereinstimmung wird nur mit den Attributen berechnet, wo wenigstens eines von beiden Objekten den Wert *true* aufweist. [KaRo09, Kap. 1.2.4 Binary Variables]

Angenommen für ein kategorisches Attribut treten im Datenset bis zu drei verschiedene Labels auf (z.B. “red”, “green” und “blue”).  $x_1$  hat das Label “red” und  $x_2$  hat “blue”. Nach der Umwandlung in binäre Werte wäre  $x_1 = (1, 0, 0)$  und  $x_2 = (0, 0, 1)$ . Das Simple Matching würde nun eine Ähnlichkeit von  $\frac{1}{3}$  berechnen, da beiden Objekten gemeinsam ist, dass sie “nicht green” sind. Bei asymmetrischen binären Attributen sind aber zwangsläufig mit steigender Anzahl an vorkommenden Labels die meisten Werte 0 bzw. *false*. Dies treibt das Ergebnis vom Simple Matching künstlich in die Höhe, macht aber inhaltlich in diesem Kontext keinen Sinn. [KaRo09, Kap. 1.2.4 Binary Variables]

Auch hier ist die dargestellte Formel ohne eine vorherige Umwandlung in binäre Attribute nutzbar, sofern die Gleichheit und Ungleichheit zwischen den Labels direkt bestimmt werden

kann. Bspw. beträgt für  $x_1 = (red, xl, up)$  und  $x_2 = (blue, xl, up)$  der Jaccard-Koeffizient  $\frac{|\{xl, up\}|}{|\{red, blue, xl, up\}|} = \frac{1}{2}$ . [King15, Kap. 9.2 ROCK]

## 2.2.4 String-Attribute

Manche Autoren (z.B. [RaRa11]) definieren eine weitere Gruppe sog. String-Attribute. Streng genommen sind dies ebenfalls nominale bzw. kategorische Attribute. Sie zeichnen sich aber durch eine hohe Variation an Werten aus, sodass häufig keine einzige Wertausprägung mehr als einmal vorkommt. Gleichzeitig sind String-Werte häufig zwar nicht exakt identisch, aber dennoch gibt es große Ähnlichkeit zwischen ihnen. Ein klassisches Beispiel wäre der Produkttitel. Die Strings “Samsung Galaxy S20 128GB” und “Samsung Galaxy S20 256GB” sind “kategorisch-betrachtet” zwei komplett verschiedene Kategorien. Dennoch herrscht augenscheinlich eine hohe Ähnlichkeit zwischen diesen beiden Werten vor. Zur Quantifizierung dieser Übereinstimmung gibt es eine Reihe von verschiedenen Ansätzen.

### String-Metrics

Eine Methode besteht aus dem Vergleich übereinstimmender Buchstaben zwischen zwei String-Werten. Dazu existieren eine Reihe sog. “String-Metriken” von verschiedenen Autoren. [CRF03]

Hamming [Hamm50] entwickelte 1950 ein Verfahren zur Fehlererkennung binärer Codes. Es bildet die Grundlage des sog. *Hamming-Abstands*, welches sich später in abgewandelter Form im Bereich der String-Metrics als Distanzmaß etablierte [RaRa11]. Der Hamming-Abstand ist die Anzahl an Buchstaben zwischen zwei Zeichenketten gleicher Länge, welche **nicht** identisch sind. Er kann nur zum Vergleich von Strings mit exakt identischer Anzahl an Buchstaben verwendet werden und liefert Abstände von 0 bis  $n$  (Anzahl an Buchstaben im jeweiligen String).

Ein Verfahren, welches auch für Strings unterschiedlicher Länge geeignet ist, ist der *Levensthein-Abstand*. Zur Berechnung wird gezählt, wie viele Buchstaben eingefügt, entfernt oder umgewandelt werden müssen, um einen String in den anderen umzuwandeln. Dabei wird stets die kleinstmögliche Zahl an Ersetzungen bevorzugt. Die Ergebnisse liegen damit ebenfalls zwischen 0 (geringster Abstand, da kein einziger Schritt zur Umwandlung nötig ist) und  $n$ , was die Anzahl an Buchstaben des längeren Strings ist. Der Nachteil dieses Verfahrens ist die recht aufwendige Berechnung, da stets mehrere Arten der Buchstabentransformationen durchgerechnet werden müssen, um die kürzeste Kette an Transformationen zu finden. [RaRa11]

Mit deutlich weniger Rechenaufwand kommt die *Jaro-Metrik* [Jaro95] aus. Sie berechnet sich aus der Menge an Buchstaben, welche in beiden Wörtern in der gleichen Reihenfolge vorkommen, zu der Menge aller Buchstaben je Wort (Dies ist eine verkürzte Darstellung. Siehe [Jaro95] oder [CRF03] für die genaue Berechnung). Das Ergebnis gibt die Ähnlichkeit beider Strings zwischen 0 (komplett unähnlich) und 1 (maximale Übereinstimmung). [CRF03]

Eine Variante des eben erklärten Maßes ist die *Jaro-Winkler-Metrik*, welcher eine etwas höhere Ähnlichkeit feststellt, wenn die ersten Buchstaben (Prefix) identisch sind. [CRF03]

In den Versuchen von Cohen [CRF03] lieferte der Jaro-Winkler-Abstand die besten Ergebnisse bei der Verwendung für das Clustering.

### Tokenization

Strings-Metrics sind eher für den Vergleich kürzerer Zeichenketten geeignet. Für ganze Textzeilen und -blöcke werden eher Verfahren aus dem Document Retrieval angewandt. [StKaKu00]

Wesentlich im Document Retrieval ist die Zerlegung eines Textes in die einzelnen Wörter, aus denen sich der Text zusammensetzt. Da in vielen Sprachen das gleiche Wort je nach Fall verschiedene Endungen (engl. stemming) aufweisen kann, werden diese Endungen häufig entfernt (z.B. mit Verfahren wie Porters Stemming Algorithmus). Ebenso weisen alle Sprachen kleine Füllwörter (z.B. Artikel, Bindewörter etc.) auf, die sehr häufig in eigentlich jedem Text vorkommen. Auch diese werden i.d.R. entfernt (engl. stop-word removal), da sie keine Relevanz für die Unterscheidung der Texte haben. Das Ergebnis ist eine Menge aus den Grundwörtern eines Textes, welche auch “Tokens” genannt werden. [StKaKu00; und CRF03]

Nach dieser “Tokenization” können zwei Texte z.B. auf ihre Ähnlichkeit überprüft werden, indem man die auftretenden Token beider Texte miteinander vergleicht. Für die Berechnung können bereits erklärte Metriken wie der Jaccard-Koeffizient eingesetzt werden. Die Tokens repräsentieren dann “Kategorien” oder Themenfelder der Texte. [CRF03]

Eine andere Möglichkeit besteht darin, die Tokens in numerische Vektoren umzuwandeln. Jedes Element im Vektor repräsentiert eines der Token und der Wert des Elementes entspricht der Anzahl, wie häufig dieses Token im ursprünglichen Text vorkommt. Dieser Vorgang wird auch als Transformation der Texte in das “Vector-Space-Model” bezeichnet. [StKaKu00]

Diese numerischen Vektoren können nun wie numerische Attribute verarbeitet werden. Allerdings existieren auch gesonderte Metriken speziell für den Bereich des Document Retrieval. Bspw. wird statt des euklidischen Abstandes häufig der “cosine”-Abstand zur Bestimmung der Distanz verwendet. [StKaKu00]

$$\text{cosine}(x_1, x_2) = \frac{|x_1 \cdot x_2|}{|x_1| \cdot |x_2|} \quad (2.14)$$

### 2.2.5 Gemischte Attribute

In einem Datenset können nicht nur Attribute des gleichen Types (z.B. ausschließlich numerisch) vorkommen. Gibt es Attribute mit unterschiedlichen Typen, so spricht man von gemischten Daten oder gemischten Attributen. Der Umgang mit diesen ist sehr vielfältig. [KaRo09, Kap. 1.2.6 Mixed Variables]

#### Umwandlung aller Attribute in den selben Typ

Eine der einfachsten Varianten besteht darin, alle Attribute in den gleichen Typ umzuwandeln. [KaRo09, Kap. 1.2.6 Mixed Variables]

**Umwandlung in numerische Werte** Für ordinale Attribute ist diese Umwandlung bereits beschrieben worden. Nominale Attribute können in eine künstliche Reihenfolge gebracht werden, wodurch sie ihren ordinalen Brüdern gleichen und entsprechend umgewandelt werden können. Diese Transformation verzerrt u.U. die Daten, da nun z.B. “rote” und “grüne” Produkte als ähnlicher betrachtet werden als “rote” und “blaue” (aufgrund der künstlichen Reihenfolge). Nichtsdestotrotz kann dieses Verfahren gute Ergebnisse produzieren. [KaRo09, Kap. 1.2.6 Mixed Variables]

Die Transformation von String-Attributen in numerische Vektoren ist ebenfalls bereits dargestellt worden.

**Umwandlung in kategorische Werte** Auch der umgekehrte Weg ist denkbar. Ordinale Attribute können als nominal betrachtet und verarbeitet werden. Ebenso können numerische Werte durch Diskretisierung in feste Gruppen oder Bänder eingeteilt werden (z.B. in Altersspannen “unter 18”, “18-35” usw.). [KaRo09, Kap. 1.2.6 Mixed Variables]

Diese Umwandlung geht aber mit einem massiven Verlust an Informationen einher. Bspw. brachte die Diskretisierung numerischer Attribute in den Versuchen von Milligan und Cooper die schlechtesten Clustering-Ergebnisse. [MiCo88]

### Subspace-Clustering

Ein ganz anderer Ansatz besteht darin, das Clustering mehrmals durchzuführen, jeweils mit jedem Attribut-Typen separat. Anschließend werden die Ergebnisse verglichen und entsprechende Erkenntnisse abgeleitet. Allerdings ist hier der Interpretationsspielraum sehr groß, sodass i.d.R. andere Arten des Vorgehens empfehlenswerter sind. [KaRo09, Kap. 1.2.6 Mixed Variables]

Dieser Ansatz wird auch als *Subspace-Clustering* bezeichnet und kann sehr weit ausgeführt werden. So werden teilweise mehrmalige Clusterings mit verschiedenen Kombinationen an Attributen (beliebigen Types) durchgeführt und bewertet. Solche Ansätze sind sehr aufwendig sowohl in Sachen Laufzeit als auch in der Interpretation der eigentlichen Ergebnisse. [JiCh17]

### Kombinierte Distanzfunktion

Schließlich besteht die Möglichkeit, verschiedene Distanzmaße zu kombinieren. Die verschiedenen Attribute also mit einer Metrik ihres Types zu verrechnen und diese Ergebnisse anschließend zu addieren. [KaRo09, Kap. 1.2.6 Mixed Variables]

Ein geläufiges Beispiel ist das kombinierte Distanzmaß des K-Prototypes-Algorithmus [Huan98], welches wie folgt definiert ist:

$$d(x_1, x_2) = d_{num}(x_1^{num}, x_2^{num}) + w \cdot d_{cat}(x_1^{cat}, x_2^{cat}) \quad (2.15)$$

Dieser Algorithmus kann numerische und kategorische Attribute gemeinsam verarbeiten. Die spezifischen Distanzmaße für jeden Attribut-Typ sind dabei frei wählbar (im Original:

euklidisch für die numerischen und Simple Matching für die kategorischen). Der Faktor  $w$  soll Unterschiede in der Gewichtung der Distanzmaße ausgleichen. So hat der euklidische Abstand umso höhere Werte, je mehr numerische Attribute vorkommen. Das Simple Matching hingegen liegt immer im Intervall  $[0; 1]$ . [Huan98]

## 2.3 Clustering-Verfahren

### 2.3.1 Partitionierendes Clustering

#### Überblick

Partitionierende Verfahren betrachten die Clusterzuteilung als ein Minimierungsproblem. Auf verschiedene Arten starten die jeweiligen Verfahren mit einer initialen Gruppierung der Datenpunkte. Anschließend werden die Clusterzuteilungen wiederholt verändert bis ein lokales Optimum erreicht ist [King15, Kap. 4.1 Partition Clustering – Introduction]. Wichtig zu erwähnen ist dabei, dass jeder Datenpunkt nur genau einem Cluster zugeordnet werden kann [KaRo09, Kap. 1.3.1 Partitioning Methods]. Die konkreten Verfahren unterscheiden sich dabei in der Art der Initialisierung der Cluster, dem genauen Ablauf der Minimierung sowie in der Definition, wann ein Clustering “besseres” ist [King15, Kap. 4.1 Partition Clustering – Introduction]. Ebenso gibt es spezielle Verfahren für das Clustern von Daten, welche nicht ausschließlich numerisch sind. [Huan98]

Kennzeichnend für diese Verfahren ist außerdem, dass die Anzahl der erwarteten Cluster im Vorfeld bekannt sein muss. Dies ist zum Teil problematisch, wenn kaum Informationen zum Datenset vorliegen. Eine mögliche Lösung ist das mehrmalige Clustern mit verschiedenen Werten für die Clusteranzahl. Anschließend kann mittels verschiedener Metriken (siehe Abschnitt Cluster-Validität) eine adäquate Clusteranzahl aus den Ergebnissen ausgewählt werden. Ebenso könnte zu erst ein hierarchisches Clustering zur Bestimmung der Clusterzahl durchgeführt werden. [King15, Kap. 4.1 Partition Clustering – Introduction]

Diese Verfahren neigen dazu in lokalen Minima während des Clusterings hängen zu bleiben. Deswegen ist es empfehlenswert, das jeweilige Verfahren mehrmals mit unterschiedlichen Start-Partitionierungen durchzuführen und anschließend das “beste” Ergebnis aus diesen Durchläufen auszuwählen. Trotz der mehrfachen Durchläufe sind partitionierende Verfahren allgemein recht effizient in ihrer Laufzeit. Die Komplexität beträgt  $\mathcal{O}(n \cdot k \cdot l)$ .  $n$  ist die Anzahl an Datenpunkten,  $k$  die Menge an gesuchten Clustern und  $l$  die mehrmalige Wiederholung des Verfahrens.  $k$  und  $l$  sind typischerweise recht kleine Werte, die auch mit steigender Anzahl von Datenpunkten im Datenset nicht zunehmen. Daher handelt es sich unterm Strich um eine lineare Laufzeit von  $\mathcal{O}(n)$ . [Huan98]

#### K-Means

K-Means ist das bekannteste partitionierende Clustering-Verfahren und gilt häufig als Inbegriff der Clusteranalyse selbst. [Huan98]

Jedes Cluster wird in diesem Verfahren durch einen Mittelpunkt  $c$  repräsentiert. Dieser Mittelpunkt oder Centroid ist kein tatsächlicher Punkt des Datensets [StKaKu00], sondern

wird aus den Punkten des Clusters berechnet. Konkret wird für jedes einzelne Attribut der Durchschnitt (engl. mean) aus den Werten der Cluster-Mitglieder für das jeweilige Attribut gebildet [King15, Kap. 4.5 K-Means Algorithm]:

$$c(C) = \frac{1}{|C|} \sum_{x_i \in C} x_i \quad (2.16)$$

Durch das Verändern der Clusterzuordnungen ändern sich entsprechend auch die Mittelpunkte der Cluster. Ziel dieser Verschiebung ist, dass die Summe der Abstände der Datenpunkte zu ihrem jeweiligen Mittelpunkt minimal wird. Der Abstand wird mit einem Distanzmaß für numerische Attribute (meist der euklidische Abstand) berechnet. [King15, Kap. 4.5 K-Means Algorithm]

Dieses Verfahren funktioniert also ausschließlich mit numerischen Attributen, da nur hier aus den Werten ein Durchschnitt berechnet werden kann. [Huan98]

Steinbach et al. [StKaKu00] beschreiben den typischen Ablauf des Verfahrens folgendermaßen:

1. Wahl von  $k$  Punkten aus dem Datenset als initiale Mittelpunkte
2. Zuordnung aller Datenpunkte des Datensets zum jeweils nächstgelegenen Mittelpunkt (mit dem geringsten Abstand)
3. Neuberechnung aller Mittelpunkte aus den Durchschnitten der zugeordneten Datenpunkte (wodurch sich diese verschieben)
4. Wiederholung der Schritte 2 und 3; solange bis sich die Clusterzuordnungen nicht mehr verändern oder ein Höchstlimit an Iterationen überschritten ist

Die Wahl der initialen Punkte kann z.B. durch die Wahl der  $k$  ersten oder letzten Punkte im Datenset geschehen. Ebenso möglich ist die Wahl jedes  $\frac{n}{k}$ -ten Punktes. Am geläufigsten ist wohl die komplett zufällige Wahl von Punkten aus dem Set. [King15, Kap. 4.3 The Initial Partition]

Zu diesem Basis-Verfahren gibt es eine große Vielfalt an Varianten und Abwandlungen. Bspw. muss die Neuberechnung der Mittelpunkte nicht erst am Ende eines Laufes durch das gesamte Datenset geschehen. Stattdessen können die Mittelpunkte auch unmittelbar, wenn ein neuer Punkt zum Cluster zugeordnet oder entfernt wird, aktualisiert werden. King [King15, Kap. 4.5 K-Means Algorithm] bezeichnet dieses alternative Vorgehen als “MacQueens-Methode”. Viele weitere Varianten sind in der Literatur beschrieben worden. Im folgenden wird nur eine kleine relevante Auswahl dessen präsentiert.

### K-Medoids

Der K-Medoids ist eine Variante des K-Means-Algorithmus, bei dem die Centroids der Cluster tatsächliche Datenpunkte des Datensets sein müssen. Anstatt den Durchschnitt der jeweiligen Attribute aller Punkte im Cluster zu berechnen, werden die Abstände aller Punkte eines Clusters zueinander betrachtet. Der Punkt, welcher in der Summe den kleinsten Abstand zu allen anderen ausweist, muss zwangsläufig “mittig” im Cluster liegen. Fortan gilt dieser Punkt als Centroid des Clusters. Dieses Verfahren ist rechenaufwendiger als der

normale K-Means. Allerdings konvergieren die Cluster häufig in weniger Durchläufen zu einem stabilen Optimum. Deshalb kann dieses Verfahren, auf den gesamten Ablauf betrachtet, dennoch Performance-Vorteile zum klassischen K-Means bringen. [ArVa16]

### K-Modes

Der K-Modes verarbeitet ausschließlich kategoriale Attribute – statt numerischen. Das Grundprinzip des K-Means bleibt bestehen. Als Distanzmaß muss eine entsprechend geeignete Metrik verwendet werden (im Original das Simple Matching). Außerdem erfolgt die Berechnung der Cluster-Mittelpunkte nicht über den Durchschnitt, da zwischen kategorischen Attributen kein Durchschnitt berechnet werden kann. Daher bilden sich die Centroids aus dem Modus (engl. mode), also dem am häufigsten auftretenden Label im jeweiligen Attribut. [Huan98]

Dieser Algorithmus verwendet außerdem den “MacQueens-Ansatz”. D.h. dass sich der Modus für jedes Attribut direkt aktualisiert, wenn ein Objekt dem Cluster neu zugeordnet oder entfernt wird. Auch hier wird dieser Prozess mehrmals durchlaufen, solange bis sich die Clusterzuteilungen nach einem kompletten Durchlauf durch das Datenset nicht mehr verändert haben. [Huan98]

### K-Prototypes

Der K-Prototypes kombiniert den K-Means- und K-Modes-Algorithmus zum Clustern gemischter Datensets. Die Centroids berechnen sich entsprechend aus dem Durchschnitt der Werte numerischer und aus dem Modus der Werte kategorischer Attribute. Die Distanz wird mittels einer kombinierten Distanzfunktion (siehe der entsprechende Abschnitt) berechnet. [Huan98]

## 2.3.2 Hierarchisches Clustering

### Überblick

Hierarchische Verfahren produzieren eine ineinander verschachtelte Partitionierung der Datenpunkte in Cluster. Dabei werden zwei grundlegende Arten von Verfahren unterschieden [StKaKu00; und King15, Kap. 3.1 Hierarchical Clustering – Introduction]:

- *Top-down- oder divisive Verfahren* beginnen mit einem Cluster, welches alle Datenpunkte enthält. Anschließend wird dieses Cluster in zwei kleinere Cluster aufgesplittet, danach werden die beiden resultierenden Cluster wiederum jeweils in zwei kleinere aufgeteilt usw. Dieses Verfahren wird solange fortgesetzt, bis nur noch Cluster übrig bleiben, die genau einen Datenpunkt enthalten.
- *Bottom-up- oder agglomerative Verfahren* starten exakt andersrum mit jeweils einem Cluster für jeden Datenpunkt. Anschließend werden immer wieder zwei Cluster zu einem größeren kombiniert, solange bis im letzten Schritt ein Cluster entsteht, welches wiederum alle Datenpunkte enthält.

Das bedeutet, dass jeder Datenpunkt mehreren verschiedenen Clustern zugeteilt ist, je nachdem welche Stufe in der Hierarchie betrachtet wird. Alternativ können die Ergebnisse auch als Baumstruktur in einem sog. Dendrogram dargestellt werden. [StKaKu00]

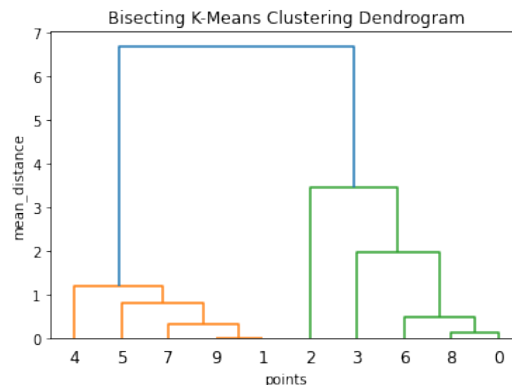


Abbildung 2.1: Bsp. eines Dendrograms

Ein großer Vorteil von diesem Verfahren ist, dass die Anzahl an gesuchten Clustern nicht vorher bekannt sein muss. Stattdessen wird eine Clusterzuteilung für alle möglichen Clusterzahlen ( $1 \leq k \leq n$ ) im Zuge der Berechnung ermittelt [KaRo09, Kap. 1.3.2 Hierarchical Methods]. Dadurch können die verschiedenen Hierarchie-Ebenen mit geeigneten Metriken (siehe Abschnitt Cluster-Validität) bewertet und anschließend z.B. eine geeignete Clusteranzahl für die Durchführung eines partitionierenden Verfahrens ausgewählt werden. [King15, Kap. 4.1 Partition Clustering – Introduction]

Weiterhin bringt die hierarchische Struktur vielfältige Möglichkeiten der Analyse. So kann nicht nur festgestellt werden, welche Objekte in verschiedene Cluster sortiert werden, sondern auch welche der Cluster sich ähnlicher sind (aufgrund ihrer Position in der Hierarchie). Das Ermitteln von Outliern wird ebenfalls möglich, da diese meistens recht früh in der Hierarchie in ihr eigenes Cluster platziert werden. [DoBi22]

Ein großer Nachteil dieser Verfahren ist, dass die Clusterzuteilungen im Laufe der Berechnung nicht mehr nachträglich korrigiert werden. Nachdem also zwei Datenpunkte in einem Top-Down-Verfahren in verschiedene Cluster gesplittet worden sind, werden sie in den nachfolgenden Hierarchie-Ebenen niemals wieder im selben Cluster landen (für Bottom-Up-Verfahren gilt das gleiche entsprechend umgekehrt). Dies führt u.U. zu einer ungeeigneten Clusterzuteilung je nach betrachteter Hierarchie-Ebene. [KaRo09, Kap. 1.3.2 Hierarchical Methods]

### Agglomeratives Clustering (Bottom-Up)

Wie bereits erklärt beginnt das agglomerative Clustering mit jedem Datenpunkt in einem eigenen Cluster. Anschließend werden stets die beiden “am nächsten gelegen” bzw. “ähnlichsten” Cluster zu einem größeren zusammengefasst. Dieser Prozess wird solange wiederholt, bis sich zum Schluss alle Datenpunkte in einem großen Cluster befinden. [StKaKu00]

Von zentraler Bedeutung dabei ist die Frage, wie zwei Cluster miteinander auf ihre Ähnlichkeit untersucht werden. Für die vorkommenden Datenpunkte wird dazu ein geeignetes Distanz- oder Ähnlichkeitsmaß gewählt. Die Berechnung der Ähnlichkeit zwischen



zwei Clustern (welche ja potenziell aus mehreren Punkten bestehen können) geschieht dann mit Hilfe sog. Fusionierungsverfahren (engl. linkage functions). Ein bekannter Vertreter ist z.B. der “Single-Link”, welcher den Abstand zwischen zwei Clustern über den Abstand der zwei am nächsten gelegenen Punkte der Cluster definiert [DoBi22]. Nachfolgend sind einige typische Vertreter aufgelistet:

**Single-Link**  $d(C_1, C_2) = \min_{x_i \in C_1, x_j \in C_2} d(x_i, x_j)$

Abstand wird durch die beiden dichtesten Punkte definiert; neigt zur Bildung von langen Ketten (chaining effect); anfällig gegen Outlier

**Complete-Link**  $d(C_1, C_2) = \max_{x_i \in C_1, x_j \in C_2} d(x_i, x_j)$

Abstand wird durch die beiden am entferntesten liegenden Punkte definiert; neigt zur Bildung von vielen sehr kleinen Clustern; anfällig gegen Outlier

**Average-Link**  $d(C_1, C_2) = \frac{1}{|C_1|} \frac{1}{|C_2|} \sum_{x_i \in C_1} \sum_{x_j \in C_2} d(x_i, x_j)$

durchschnittlicher Abstand aller Punkte der beiden Cluster zueinander; ähnlich dem Mittelpunkt von k-Means, aber viel aufwendiger, da immerzu jeder Punkt eines Clusters mit jedem anderen Punkt der anderen Clustern verglichen werden muss

**Centroid-Link**  $d(C_1, C_2) = d([\frac{1}{|C_1|} \sum_{x_i \in C_1} x_i], [\frac{1}{|C_2|} \sum_{x_j \in C_2} x_j])$

Abstand der Mittelpunkte der Cluster zueinander (Berechnung des Mittelpunktes wie bei K-Means); ähnliches Verhalten wie Average-Link, aber effizienter zu berechnen, da der Mittelpunkt nur einmal pro Cluster berechnet werden muss

**Ward-Methode**  $d(C_1, C_2) = \frac{|C_1||C_2|}{|C_1|+|C_2|} d([\frac{1}{|C_1|} \sum_{x_i \in C_1} x_i], [\frac{1}{|C_2|} \sum_{x_j \in C_2} x_j])$

berechnet die Zunahme der Varianz durch den jeweiligen Merge; neigt zur Bildung von Kreis- oder Kugelförmigen Clustern; recht effizient; anfällig gegen Outlier

Da für den Centroid-Link und die Ward-Methode die Mittelpunkte der Cluster gebildet werden müssen, sind diese Verfahren primär nur für numerische Datensets geeignet [Do-Bi22]. Die Verwendung dieser Verfahren für gemischte Attribute (z.B. durch Verwendung des Modus für kategoriale) ist in der Literatur nicht beschrieben worden.

Ein großer Nachteil dieser Verfahren ist die Laufzeit. Da im ersten Schritt jeder Datenpunkt mit jedem anderen verglichen werden muss (es sind ja zu Beginn  $n$  Cluster), beträgt die Laufzeit immer mindestens  $\mathcal{O}(n^2)$ . Durch geschickte Implementierung, kann diese Laufzeit auch für einige Verfahren (z.B. für Single- [Sibs73] oder Complete-Link [Defa77]) tatsächlich erreicht werden. Häufig liegen die Laufzeiten aber bei  $\mathcal{O}(n^2 \log n)$  oder sogar  $\mathcal{O}(n^3)$ . [DoBi22]

## Divisives Clustering (Top-Down)

**Überblick** Divisives Clustering startet mit allen Datenpunkten in einem großen Cluster. Anschließend werden immerwieder Zweier-Splits der Cluster durchgeführt, solange bis final jeder Datenpunkt in genau einem eigenen Cluster platziert ist. [KaRo09, Kap. 6 Divisive Analysis (Program DIANA)]

Lange Zeit wurde dieser Ansatz des hierarchischen Clusterings ignoriert, da das Verfahren auf den ersten Blick sehr rechenintensiv erscheint. Im aller ersten Zustand, wenn alle Punkte in einem Cluster sind, gibt es theoretisch  $2^n - 1$  verschiedene Möglichkeiten dieses große Cluster in zwei kleinere zu teilen. Eine solche exponentielle Laufzeit könnte niemals für Datensets auch nur mittlerer Größe verwendet werden. Allerdings ist es nicht nötig alle dieses Splits zu betrachten und durchzurechnen. Mittlerweile gibt es einige Ansätze für diese Art von

Clustering-Verfahren, welche dieses Problem geschickt umgehen. [KaRo09, Kap. 6 Divisive Analysis (Program DIANA)]

Außerdem zeigt die Praxis, dass Top-down-Clustering i.d.R. bessere und intuitivere Cluster generiert. Der Grund ist vermutlich, dass wir Menschen beim Clustering per Hand automatisch eine Art Top-down-Denkweise an den Tag legen. [King15, Kap. 3.3 Agglomerative versus Divisive Clustering]

**DIANA** DIANA steht für “divisive analysis” und wurde von Kaufman und Rousseeuw [KaRo09, Kap. 6 Divisive Analysis (Program DIANA)] nach einer Idee von Macnaughton-Smith et al. [MWDM64] entwickelt.

Sie beschreiben den Ablauf über die Analogie einer politischen Partei, welche sich durch Meinungsverschiedenheiten aufsplittet. Zuerst tritt das Mitglied mit den größten Differenzen zum Rest der Partei aus derselbigen aus und gründet eine eigene. Anschließend entscheiden sich nach und nach die restlichen Mitglieder, ob sie ebenfalls “die Fronten wechseln” oder in der ursprünglichen Partei verbleiben wollen [KaRo09, Kap. 6 Divisive Analysis (Program DIANA)]. Aufgrund dieser Analogie wird das Verfahren auch als “Splitterpartei-Methode” bezeichnet [RaRa11].

Konkret lässt sich das Verfahren von Kaufman und Rousseeuw, wie folgt beschreiben:

1. Start mit allen Punkten in einem großen Cluster
2. Berechnung des durchschnittlichen Abstandes jedes Datenpunktes zu den restlichen Punkten im Cluster
3. der Punkt mit der größten mittleren Abweichung verlässt das große Cluster und bildet ein neues
4. alle restlichen Punkte aktualisieren ihren durchschnittlichen Abstand
5. die Punkte, deren durchschnittlicher Abstand zum Cluster größer ist als ihr Abstand zum neu herausgelösten (also der Splittergruppe), verlassen das ursprüngliche Cluster ebenfalls und werden dem neuen Cluster zugeordnet
6. Wiederholung der Schritte ab 4., solange bis keine Punkte mehr das Cluster wechseln
7. aus den entstandenen Clustern wird das größte (mit dem größten Durchmesser) ausgewählt und die Schritte ab 2. wiederholt, solange bis jeder Datenpunkt in einem eigenen Cluster gelandet ist

Der *durchschnittliche Abstand*  $md$  eines Datenpunktes  $x_i$  zu den anderen Punkten  $x_j$  im Cluster  $C$  berechnet sich aus dem Durchschnitt der einzelnen Abstände zu den jeweils anderen Punkten. Diese Abstände werden mit einem geeigneten Distanzmaß berechnet. Damit ist dieses Verfahren für jede Art von Datentypen geeignet, zu denen auch ein Distanzmaß konzipiert werden kann. Mathematisch berechnet sich  $md$  für den Datenpunkt  $x_i \in C$ , wie folgt:

$$md(x_i, C) = \frac{1}{|C| - 1} \sum_{x_j \in C, x_i \neq x_j} d(x_i, x_j) \quad (2.17)$$

Im Ablauf des Verfahrens ist von einem *Clusterdurchschnitt* die Rede. Es dient zur Bestimmung, welches Cluster als nächstes geteilt werden soll. Der Clusterdurchschnitt  $cd$  ist der Abstand der beiden Datenpunkte im Cluster, die am weitesten voneinander entfernt sind:

$$cd(C) = \max_{x_i \in C, x_j \in C} d(x_i, x_j) \quad (2.18)$$

Die genaue Laufzeit des Verfahrens ist nirgendwo beschrieben worden. Am maßgeblichsten müsste der Split des ersten großen Clusters für die Laufzeit sein. Hier werden initial alle Datenpunkte miteinander verrechnet, sodass mindestens eine Laufzeit von  $\mathcal{O}(n^2)$  zustande kommt. Die nachfolgenden Splits sind zunehmend weniger aufwendig in der Berechnung, da die Cluster mit jedem Durchlauf kleiner werden. Dadurch sinkt die Menge an Datenpunkten, die miteinander verrechnet werden müssen, immer weiter ab.

Rajalingam und Ranjini [RaRa11] verglichen die Performance einiger Bottom-up-Verfahren mit einem Top-down-Verfahren, welches dem beschriebenen DIANA entweder identisch oder sehr ähnlich ist. In ihren Versuchen war das Top-down-Verfahren fast doppelt so schnell in der Berechnung der Cluster.

**Bisecting K-Means** Der Bisecting K-Means wurde von Steinbach et al. [StKaKu00] zum Clustern von Dokumenten entwickelt. Ihr ursprünglicher Plan war der Vergleich von agglomerativen Verfahren mit dem klassischen K-Means-Algorithmus. In diesem Prozess entwickelten sie die Idee für das divisive Verfahren – Bisecting K-Means.

Initial befinden sich wieder alle Datenpunkte in einem großen Cluster. Für den Split in zwei kleinere Cluster wird nun der klassische K-Means-Algorithmus mit  $k = 2$  ausgeführt. Aus den resultierenden kleineren Clustern gilt es nun einen Kandidaten für den nächsten Split auszuwählen. Das kann das Cluster mit dem größeren Durchschnitt oder mit der höheren Anzahl an Datenpunkten sein (in ihren Versuchen ergab sich zwischen beiden Vorgehen kein Unterschied). Der Split wird wiederum durch K-Means mit  $k = 2$  ausgeführt usw. Das Verfahren endet, wie gewohnt, wenn alle Punkte in ihrem eigenen Cluster gelandet sind. [StKaKu00]

Das Verfahren besticht durch seine Laufzeit  $\mathcal{O}(n)$ , welche durch den K-Means für den allerersten Split bestimmt wird. Alle folgenden Splits sind durch die kleinere Menge an Datenpunkten je Cluster zu vernachlässigen. [StKaKu00]

## 2.4 Cluster-Validität

### 2.4.1 Überblick

Die Clusteranalyse selbst ist ein Verfahren des unüberwachten Lernens und findet interne Muster in Daten ohne Referenz zu externen Zuweisungen (Labels). Dennoch finden verschiedene Clusteringverfahren unterschiedliche Gruppenzuteilungen. Auch die verschiedenen Parameter, die für ein jeweiliges Clusteringverfahren gesetzt werden, beeinflussen das Ergebnis. Daher bedarf es Methoden zur Evaluation und Vergleich der Clusterings miteinander. [RAAQ11]

**Externe Indizes** (engl. External Indices) sind Metriken, welche die berechnete Gruppenzuteilung mit einer extern vorgegeben Zuteilung vergleicht. Das heißt, es gibt eine erwartete Art der Gruppierung, welche nicht Teil des Datensets selbst ist. Diese Indizes messen nun den

Grad der Übereinstimmung zwischen berechnetem und gewünschtem Clustering-Ergebnis. [RAAQ11]

**Interne Indizes** (engl. Internal Indices) messen die Qualität des Clusterings ohne externe Informationen. Die Cluster sollten möglichst “kompakt” gruppiert und die verschiedenen Gruppen “gut von einander getrennt” sein. Diese Indizes versuchen diese Anforderungen zu quantifizieren. [RAAQ11; und King15, Kap. 8.1. Cluster Validity – Introduction]

Die **Stabilität** ist ebenfalls ein wichtiger Faktor. Hierbei wird das Datenset mehrmals mit verschiedenen Modifikationen geclustert. Solche Modifikationen können die Änderung einzelner Werte oder das Weglassen ganzer Spalten sein. Ein “stabiles” Clustering erzeugt auch mit diesen Veränderungen ähnliche Ergebnisse. Für die konkrete Bewertung der Stabilität werden externe oder interne Indizes verwendet und ihre Ergebnisse über die verschiedenen Clusterings miteinander verglichen. [King15, Kap. 8.1. Cluster Validity – Introduction]

Manche Autoren (z.B. [RAAQ11] und auch [King15]) führen formal noch sog. **Relative Indizes** an. Hiermit wird die Performance verschiedener Clustering-Verfahren und verschiedener Meta-Parameter der Clusterings über das gleiche Datenset verglichen. In der Praxis erfolgt dies aber stets über den Vergleich der externen oder internen Indizes der Clustering-Ergebnisse miteinander.

## 2.4.2 External Indices

### Überblick

Zur Bewertung der Übereinstimmung zweier Clustering-Ergebnisse können grundsätzlich Metriken aus dem Bereich der Klassifikation verwendet werden [HuAr85]. Beispiele dafür wären Maße wie die Entropie oder ihr Gegensatz die Reinheit (engl. purity), welche analysieren, wie viele falsche zu richtigen Zuordnungen innerhalb einer Klasse aufgetreten sind [RAAQ11]. Ebenso das F-Maß (engl. F-Measure), welches aus dem Bereich des Document Retrievals bekannt ist. Es simuliert durchgeführte “Suchen” und vergleicht die gefundenen mit den erwarteten Suchergebnissen [RAAQ11; und StKaKu00].

Das Problem mit diesen Maßen ist, dass die Benennung der Labels im Ergebnis von entscheidender Bedeutung in der Bewertung ist. Nehmen wir an, wir haben ein Datenset  $X$  mit vier Datenpunkten. Die berechnete Clusterzuordnung ist  $Y = (0, 0, 1, 1)$  und die erwartete Zuordnung ist  $Y' = (1, 1, 0, 0)$ . Metriken der Klassifikation würden eine Übereinstimmung von null Prozent feststellen, da keines der Labels in  $Y$  und  $Y'$  den gleichen Klassen zugeordnet worden ist. Im Kontext der Clusteranalyse weisen  $Y$  und  $Y'$  aber eine perfekte Übereinstimmung auf, denn es geht alleine um die Zuordnung der Datenpunkte in die gleichen Gruppen. Wie diese Gruppen benannt werden (in diesem Beispiel 0 und 1), spielt dabei keine Rolle. Daher sind für die Clusteranalyse eigene Metriken entwickelt worden, welche unabhängig von der Benennung der Labels die Übereinstimmung zwischen den Zuordnungen berechnen können. [Rand71; und HuAr85]

## Rand-Index

Der Rand-Index war einer der ersten Metriken, die speziell für die Clusteranalyse entwickelt worden sind [King15, Kap. 8.4 Indices of Cluster Validity]. William M. Rand veröffentlichte dieses Maß 1971 [Rand71] und es ist immer noch eines der populärsten und weitverbreitetsten (bzw. vor allem die Verbesserungen dieses Indexes siehe nächster Abschnitt). [HuAr85; und Stei04]

Um unabhängig von der Benennung der Labels zu werden, vergleicht man nicht wie in der Klassifikation die gefundenen Labels eins zu eins miteinander. Stattdessen werden alle möglichen Paarungen der Datenpunkte in  $X$  betrachtet und die Zuordnung der Paare in  $Y$  und  $Y'$  miteinander verglichen. [Rand71]

Tabelle 2.3: Kontingenz der Datenpunkt-Paare in  $Y$  und  $Y'$  [Stei04]

$Y \setminus Y'$	Paar im gleichen Cluster	Paar in anderem Cluster
Paar im gleichen Cluster	$a$	$b$
Paar in anderem Cluster	$c$	$d$

Die Tabelle zeigt die möglichen Fälle: Ein Paar aus Datenpunkten kann entweder dem gleichen Cluster oder zwei unterschiedlichen Clustern zugeordnet worden sein. Haben sowohl  $Y$  als auch  $Y'$  das Paar jeweils in das gleiche Cluster (mit dem gleichen Label wie auch immer dieses benannt ist) zugeordnet, so wird dieses Paar zu  $a$  gezählt. Haben beide jeweils ein unterschiedliches Cluster zugeordnet, so wird das Paar in  $d$  gezählt usw. [Stei04]

$$rand = \frac{a + d}{a + b + c + d} = \frac{a + d}{\binom{n}{2}} \quad (2.19)$$

Der Rand-Index teilt nun die Menge an Paaren, welche die gleiche Zuordnung erhalten haben ( $a$  und  $d$ ) durch die Anzahl aller möglichen Paarungen. Das Ergebnis ist ein Wert zwischen 0 (keine Übereinstimmung) und 1 (perfekte Übereinstimmung). [Rand71]

Der Rand-Index weist eine Reihe von Problemen auf, welche teilweise von Rand selbst erkannt oder später ermittelt worden sind:

- Je höher die Anzahl an Clustern ist, desto höher (näher an der 1) liegt der Rand-Index standardmäßig. Das kommt daher, dass bei einer hohen Anzahl an Clustern die meisten Paare unterschiedlichen Clustern zugewiesen sein müssen. Das treibt den Index künstlich in die Höhe. [Stei04; teilweise zitiert nach Rand71]
- Zum Vergleich verschiedener Clustering-Verfahren werden häufig Monte-Carlo-Simulationen mit großen Mengen an zufällig generierten Datensätzen und Clusterings verwendet. Werden zwei Zufalls-Zuordnungen miteinander verglichen, so gibt der Rand-Index keine Werte nahe der 0, was aber wünschenswert wäre. Das liegt daran, dass die Anzahl an zufälligen Übereinstimmungen nicht adäquat herausgerechnet wird. [HuAr85; und King15, Kap. 8.4 Indices of Cluster Validity]

## Adjusted Rand-Index

Aus den genannten Problemen haben eine Vielzahl von Autoren versucht, eine bessere Variante des Rand-Indexes zu finden. Vor allem das “Herausrechnen” von angeblichen hohen Übereinstimmungen bei zufälligen Zuteilungen (engl. correction for chance) ist eines der Hauptanliegen gewesen [HuAr85]. Von allen vorgestellten Lösungen scheint die Variante von Hubert und Arabie [HuAr85] diejenige mit den wünschenswertesten Eigenschaften zu sein. (siehe die Versuche z.B. von Steinley [Ste04])

$$arand = \frac{rand - rand_{expected}}{rand_{max} - rand_{expected}} \quad (2.20)$$

Im Allgemeinen geht es darum, den Rand-Index zu berechnen und anschließend den “erwarteten Rand-Index” für zufällige Zuordnungen davon abzuziehen. Verschiedene Autoren haben nun unterschiedliche Methoden hergeleitet, um diesen “erwarteten Rand-Index” zu berechnen. [HuAr85]

$$arand = \frac{\binom{n}{2}(a+d) - [(a+b)(a+c) + (c+d)(b+d)]}{\binom{n}{2}^2 - [(a+b)(a+c) + (c+d)(b+d)]} \quad (2.21)$$

Hubert und Arabie berechnen den “erwarteten Rand-Index” aus der Menge aller möglichen Permutationen der Paarungen und ihrer Übereinstimmung  $\frac{(a+b)(a+c) + (c+d)(b+d)}{\binom{n}{2}}$ . Die gegebene Formel zeigt eine breits vereinfachte Umstellung von Steinley. [HuAr85; und vereinfachte Formel aus Stei04]

Dieser “Adjusted Rand-Index” liefert Werte zwischen  $-1$  und  $1$ . Negative Ergebnisse oder Werte um die  $0$  zeigen, dass die Übereinstimmung der beiden Clusterings eher auf den Zufall zurückzuführen und damit nicht signifikant ist. Höhere Zahlen nahe der  $1$  stehen nach wie vor für eine perfekte Übereinstimmung, welche zusätzlich statistische Signifikanz aufweist. Auch der Bias zu hohen Werten bei einer hohen Anzahl an Clustern wird dadurch ausgeglichen. [HuAr85; und Stei04]

### 2.4.3 Internal Indices

In der Literatur werden eine Vielzahl von Indizes beschrieben, welche die Qualität der gefundenen Cluster messen können. Einen Überblick dazu geben Rendón et al. [RAAQ11]. An dieser Stellen sollen nur ein paar Vertreter vorgestellt werden, welche für diese Arbeit von besonderer Relevanz sind.

#### Silhouettenkoeffizient

Der Silhouettenkoeffizient wurde von Peter J. Rousseeuw entwickelt [Rous87] und ist ein häufig verwendetes Maß für die Qualität von Clusterings.

$$s(x) = \frac{b(x) - a(x)}{\max a(x), b(x)} \quad (2.22)$$

$$a(x) = d(x, C_x) \quad (2.23)$$

$$b(x) = \min_{C_x \neq C_i} d(x, C_i) \quad (2.24)$$

Für jeden Datenpunkt  $x$  im Datenset wird die Silhouetten-Weite  $s(x)$  berechnet. Diese ergibt sich aus der Differenz zwischen dem durchschnittlichen Abstand zu allen Datenpunkten im selben Cluster ( $a(x)$ ) und dem durchschnittlichen Abstand zu allen Datenpunkten im direkt benachbarten Cluster ( $b(x)$ ). Anschließend wird der Wert zwischen  $-1$  und  $1$  normiert. [Rous87]

- Eine negative Silhouetten-Weite gibt an, dass der Datenpunkt näher am benachbarten als an seinem eigenen Cluster liegt und somit falsch zugeordnet worden ist.
- Werte um die 0 zeigen, dass der Datenpunkt fast mittig zwischen beiden Clustern platziert ist.
- Befindet sich die Weite nahe der 1, so liegt der Datenpunkt mittig in seinem eigenen Cluster und das benachbarte Cluster ist ordentlich weit entfernt.

$$sil = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n s(x_i) \quad (2.25)$$

Der Koeffizient ergibt sich schließlich aus dem Durchschnitt aller Silhouetten-Weiten aller Datenpunkte. Werte nahe der 1 deuten auf kompakte und wohl-separierte Cluster hin. [Rous87]

In den Versuchen von Rendón et al [RAAQ11] erwies sich dieser Index als einer der besten Indikatoren für ein gutes Clustering-Ergebnis. Er ist die direkte mathematische Definition für die Anforderung, dass Datenpunkte im gleichen Cluster möglichst ähnlich und zu den Punkten der anderen Cluster möglichst unähnlich sein sollen. Ein Nachteil dieses Indizes ist die quadratische Laufzeit, da jeder Punkt mit jedem anderen verglichen werden muss.

### Davies-Bouldin Index

Der Davies-Bouldin Index wurde von seinen Namesgebern David L. Davies und Donald W. Bouldin [DaBo79] entwickelt. Ziel war es, eine Metrik zu konstruieren, welche die durchschnittliche Ähnlichkeit zwischen benachbarten Clustern berechnet.

$$dbi = \frac{1}{k} \sum_{i=1}^k \max_{i \neq j} \frac{d(c_i, C_i) + d(c_j, C_j)}{d(c_i, c_j)} \quad (2.26)$$

Die Ähnlichkeit zwischen den Clustern  $K$  ( $K$  steht hier für die Menge an gefundenen Clustern  $C_i$ ) berechnet sich aus dem durchschnittlichen Abstand der Punkte eines Clusters zu ihrem Cluster-Mittelpunkt ( $d(c_i, C_i)$  und  $d(c_j, C_j)$ ) geteilt durch den Abstand der beiden Cluster-Mittelpunkte zueinander ( $d(c_i, c_j)$ ). [DaBo79]

Je kleiner der Wert des Indexes, desto enger liegen die Datenpunkte um ihren Cluster-Mittelpunkt im Verhältnis zum benachbarten Cluster. Möglichst niedrige Werte nahe der 0 sind also als optimal anzusehen. [DaBo79]

Der große Vorteil von diesem Verfahren ist die geringere Laufzeit, da die Punkte der Cluster nur mit ihrem Mittelpunkt verrechnet werden. Nachteilig ist, dass die Be- und Verrechnung der Mittelpunkte primär nur für numerische Vektoren definiert ist. In den Versuchen von Rendón et al. [RAAQ11] schnitt dieser Index genauso gut ab wie der Silhouettenkoeffizient.

---

In diesem Kapitel wurde ein breiter Überblick zu den verschiedenen Abstanzmaßen, Clustering-Verfahren und Metriken zur Bewertung der gefundenen Cluster gegeben. Daraus wird im folgenden Kapitel ein geeignetes Clustering-Verfahren zur Beantwortung der Kernfrage hergeleitet sowie passende Metriken für eine praktische Überprüfung des Verfahrens ausgewählt.



## 3 Konzeption

### 3.1 Überblick

Zur Beantwortung der Kernfrage wird ein Konzept für das Clustern komplexerer Datenstrukturen erarbeitet und anschließend evaluiert. Diese Herleitung soll aber nicht nur theoretischer Natur sein. Daher wird die Überprüfung des Konzeptes an einem möglichst realen Beispiel mit realitätsnahen Daten erfolgen. Die folgende Grafik zeigt einen Überblick zum Praxisteil dieser Arbeit:

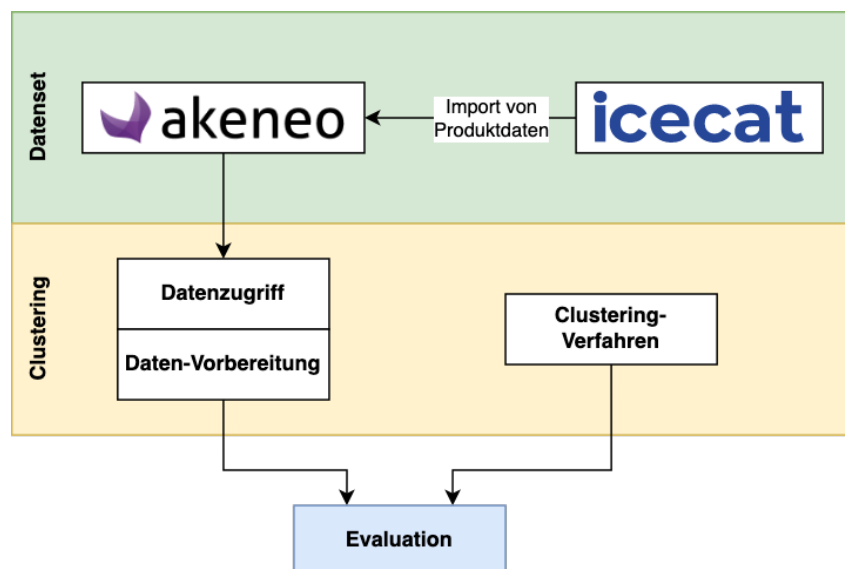


Abbildung 3.1: Grober Architektur-Entwurf für den Praxisteil

Um ein authentisches *Datenset* in den typischen Datenstrukturen zu erhalten, wird eine Instanz des Product-Information-Management-Systems Akeneo-PIM aufgesetzt und mit Produktdaten aus dem umfangreichen Online-Katalog Icecat gefüllt. Im Abschnitt Datenquellen & -sets werden beide Komponenten genauer erläutert. Außerdem werden genaue Anforderungen für die Auswahl der Produkte, welche importiert werden, definiert.

Parallel wird ein Konzept für ein *Clustering-Verfahren* erarbeitet, welches die vielfältigen Datenstrukturen verarbeiten kann. Dies setzt i.d.R. eine entsprechende Vorverarbeitung der Daten voraus. Das entsprechende Konzept wird im Abschnitt Clustering-Verfahren hergeleitet.

In der *Evaluation* kommt schließlich das erstellte Datenset mit dem erarbeiteten Clustering-Verfahren zusammen. Es wird überprüft, inwiefern das Verfahren "sinnvolle" Cluster in den Produktdaten findet. Eine genaue Definition von "sinnvollem" Clustering sowieso die konkrete Berechnung entsprechender Metriken usw. wird im Abschnitt Evaluation dargelegt.

## 3.2 Datenquellen & -sets

### 3.2.1 Akeneo-PIM

Als realistische Datenquelle ist das Product-Information-Management-System Akeneo-PIM <https://www.akeneo.com/de/akeneo-pim-community-edition/> ausgewählt worden.

#### Überblick

Der Ursprung von Product-Information-Management-Systemen liegt in gedruckten Produktkatalogen. Speziell im letzten Jahrhundert waren diese die zentrale Form, wie Produktdaten verteilt und verwaltet worden sind. Mit beginnender Digitalisierung und dem Aufkommen des E-Commerce in den 1990er-Jahren wurden zunehmend computer-basierte Systeme zur Warenhaltung und Bestellabwicklung, sog. ERP-Systeme, verwendet. Anfangs wurden in diesen Systemen auch die Produktdaten gespeichert. Dieses Vorgehen stieß aber zunehmend an Grenzen, da die schiere Vielfalt an Daten (Produkte, Bestellungen, Transaktionen, Warenbestand usw.) schwer zu verwalten war. Mitte der 2000er kamen spezielle Systeme zum Einsatz, die lediglich die Produktdaten enthielten. Somit konnte der “Produktkatalog” zentral verwaltet, angereichert, übersetzt und aufbereitet werden. Weitere Systeme (z.B. besagte ERP-Systeme) konnten nun auf diesen zentralen Katalog zugreifen und müssen selbst nur minimale Informationen zu den Produkten vorhalten. PIM-Systeme sitzen daher heute häufig im Zentrum der Unternehmens-Architektur und dienen als zentrale Datenquelle für die angeknüpften Systeme. [Pimc22]

“Akeneo-PIM” der gleichnamigen Firma ist ein solches PIM-System, welches heute breite Anwendung findet. Es ist in einer betreuten Enterprise Edition erhältlich sowie als Open-Source-Variante “Akeneo-PIM Community Edition” (verfügbar unter <https://github.com/akeneo/pim-community-dev>), welche selbst gehostet werden muss. Die Community-Variante ist frei erhältlich und daher sehr populär. [Aken22a]

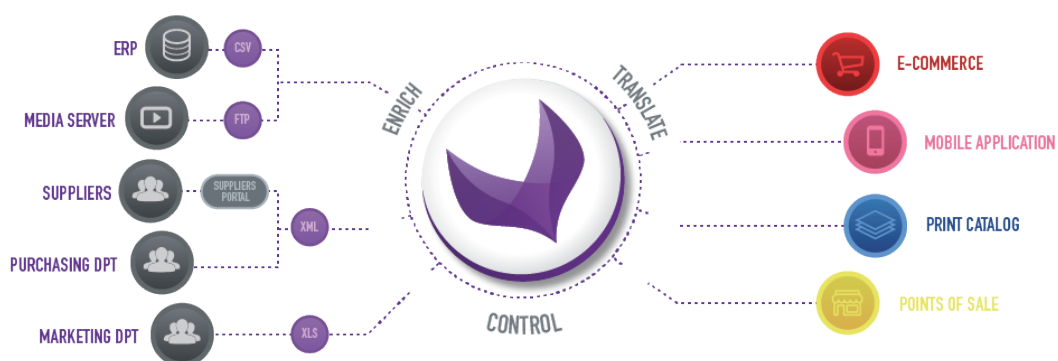


Abbildung 3.2: Schematische Darstellung der Funktionen von Akeneo-PIM [Aken22b]

Ein weiterer Grund für die weite Verbreitung ist, dass Akeneo-PIM über diverse Schnittstellen an externe Systeme angebunden werden kann. Ebenso unterstützt es eine Vielzahl an Import- und Export-Möglichkeiten in unterschiedliche Datenformaten. Es gibt außerdem

den “Akeneo App Store” (<https://marketplace.akeneo.com/>), wo viele Anbieter Plugins veröffentlichen, um die Funktionen und Anbindungen von Akeneo-PIM zu erweitern. [Aken22b]

Diese Gründe führten zur Verwendung von Akeneo-PIM für diese Arbeit.

## Systemübersicht

Akeneo-PIM ist eine PHP-Applikation, welche auf dem Symfony-Framework basiert. Für die Datenspeicherung wird die Verwendung von einer MySQL-Datenbank empfohlen. Zum schnelleren Suchen und Abrufen kommt Elasticsearch zum Einsatz. [Aken22c] Hinzu kommen weitere Technologien zur Generierung des Webfrontends. Um diesen verschiedenen Tools Herr zu werden, stellt Akeneo Konfigurationen für Containerization-Tools wie Docker-Compose zur Verfügung. [Aken22d]

Das System kann über ein Webfrontend genutzt werden. Hier lassen sich verschiedene Nutzer und Applikationen hinterlegen, welche verschiedene Berechtigungen zum Abrufen und Bearbeiten der Daten bekommen können.

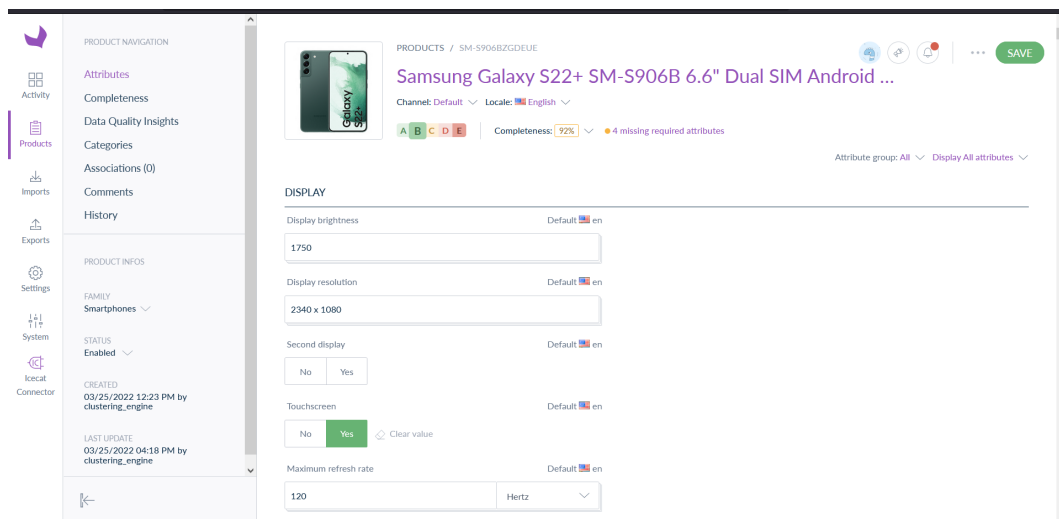


Abbildung 3.3: Akeneo-PIM Webfrontend bei der Bearbeitung eines Produktes

Eine Restful-API steht ebenfalls zur Verfügung, um Daten mittels HTTP-Requests abzurufen und zu verändern. In der Regel werden die Daten im JSON-Format transferiert und zurückgegeben. [Aken22e]

## Datenstrukturen

Innerhalb von Akeneo-PIM kommen eine Vielzahl von verschiedenen Datenstrukturen zum Einsatz. Im Folgenden werden nur die für diese Arbeit wichtigsten Strukturen kurz erklärt.

**Product & Product Values** Die Produkte sind das zentrale Element in Akeneo-PIM. Aus ihnen leiten sich eine Reihe weiterer Strukturen ab. [Aken22f]

Jedes Produkt wird genau einer “Family” zugeordnet. Sie bestimmt, welche Attribute dieses Produkt aufweisen sollte.

Ein Produkt kann einer oder mehreren “Categories” zugeordnet sein. Der Sinn dabei ist der Aufbau z.B. von Navigationsstrukturen. Hierbei ist die Zuordnung in mehrere verschiedene Kategorien möglich.

Die “ProductValues” sind die tatsächlichen Wertausprägungen eines Produktes. Sie werden in Form einer Hash-Map angegeben. Der Key der Einträge ist stets der “code” eines bestimmten “Attributes” (eine weitere Datenstruktur). Dieses Attribut wird separat definiert und legt verschiedene Constraints für den “ProductValue” fest. Dabei bietet Akeneo volle Flexibilität. Jedes Produkt kann jedes beliebige Attribut mit einem entsprechenden Wert aufweisen.

```

1 {
2   "identifier": "1111111195",
3   "family": "clothing",
4   "categories": ["tshirts"],
5   "values": {
6     "ean": [
7       {"locale": null, "scope": null, "data": "1234567890207"}
8     ],
9     "size": [
10      {"locale": null, "scope": null, "data": "s"}
11    ],
12    // ...
13  },
14  "enabled": true,
15  "created": "2017-10-05T11:25:48+02:00",
16  "updated": "2017-10-05T11:25:48+02:00",
17  // ...
18 }

```

**Category** Mit einer “Category” können Produkte in verschiedene Kategorien sortiert werden. Wichtig ist, dass “Categories” beliebig verschachtelt und hierarchisch sortiert werden können. Es gibt kein Limit für die Tiefe der Verschachtelung. [Aken22g]

```

1 {
2   "code": "tvs_projectors",
3   "parent": "master",
4   "labels": {
5     "en_US": "TVs and projectors",
6     // ...
7   }
8 }

```

Viele der Entitäten in Akeneo-PIM weisen eine ähnliche Grundstruktur auf. So haben viele Objekte einen sog. “code”, welcher als eindeutiger Identifier des Objektes fungiert. Beziehen sich die verschiedenen Entitäten aufeinander, so geschieht dies stets über den besagten “code”. Die dargestellte “Category” definiert bspw. über den Key “parent”, dass die Kategorie mit dem Code “master” eine Hierarchie-Stufe darüber steht.

Ebenso haben viele Entitäten “labels”, welche dem angezeigten Namen dieser Entität im Webfrontend entspricht. Der Name kann lokalisiert werden.

**Family** Eine “Family” definiert die Attribute, welches ein zugehöriges “Product” aufweisen sollte. Dies ist allerdings keine strikte Zuteilung. Produkte können auch Attribute aufweisen, welche gar nicht in ihrer “Family” vorgesehen sind. Ebenso können in der Family erforderliche (engl. required) Attribute hinterlegt werden. Produkte müssen diese aber nicht erfüllen. Das Produkt weist dann lediglich einen niedrigeren “Completeness Score” auf. Dadurch kann in Akeneo auch mit unvollständigen Produkten gearbeitet werden, bevor man diese weiter anreichert. [Aken22g]

```

1 {
2   "code": "camcorders",
3   "attributes": ["description", "name", "optical_zoom"],
4   "attribute_requirements": {
5     "ecommerce": ["description", "name", "optical_zoom"],
6     "mobile":    ["name"],
7     // ...
8   },
9   "labels": {
10    "en_US": "Camcorders",
11    // ...
12  }
13 }
```

Die Erforderlichkeit von Attributen kann für jeden Channel einzeln definiert werden. Für eine Erklärung zu Channels siehe Abschnitt Channel, Currency, Locale.

**Attribute & Attribute Group** Die verschiedenen Wertausprägungen eines Produktes müssen einem entsprechenden “Attribute” zugeordnet sein. Ein solches Attribut muss zuerst definiert werden, bevor Produkte einen Wert darin aufweisen können. [Aken22g]

```

1 {
2   "code": "auto_exposure",
3   "type": "pim_catalog_boolean",
4   "group": "technical",
5   "localizable": false, // erlaubt andere Werte in anderen Sprachen
6   "scopable": false,    // erlaubt andere Werte auf anderen Channels
7   "unique": false,      // verhindert die mehrfache Verwendung eines Wertes
8   // ... diverse weitere Constraints
9 }
```

Jedes Attribut kann einer “AttributeGroup” zugeordnet werden. Dies erlaubt das bessere Strukturieren der Attribute. [Aken22g]

Jedes Attribut ist einem `type` zugeordnet, welches den Datentyp anzeigt. Z.B. der Typ `pim_catalog_boolean` zeigt einen booleschen Wert an, `pim_catalog_text` eine Textzeile usw. Zusätzlich können in einem Attribut auch weitere Constraints für die jeweiligen Typen definiert werden. Bspw. kann mit dem Constraint `decimals_allowed` festgelegt werden, ob ein numerisches Attribut Nachkommastellen erlaubt oder nicht [Aken22g]. Auf diese Constraints wird allerdings nicht weiter eingegangen, da sie für diese Arbeit keine Rolle spielen. Die folgende Tabelle zeigt eine Auflistung aller möglicher Typen.

Tabelle 3.1: Attribut-Typen in Akeneo-PIM [Aken22h]

Akeneo-Typ	Erklärung
<code>pim_catalog_identifier</code>	eindeutige Id
<code>pim_catalog_text</code>	Textzeile
<code>pim_catalog_textarea</code>	mehrzeiliger Textblock
<code>pim_catalog_simpleselect</code>	einfache Auswahl aus einer Liste an Optionen
<code>pim_catalog_multiselect</code>	mehrfache Auswahl aus einer Liste an Optionen
<code>pim_catalog_boolean</code>	boolescher Wert
<code>pim_catalog_date</code>	Datum
<code>pim_catalog_number</code>	einfache rationale Zahl
<code>pim_catalog_metric</code>	rationale Zahl mit Recheneinheit
<code>pim_catalog_price_collection</code>	Preise je Währung
<code>pim_catalog_image</code>	Bild
<code>pim_catalog_file</code>	sonstige Datei (z.B. Datenblatt als PDF)
<code>pim_reference_data_simpleselect</code>	einfache Auswahl einer "ReferenceEntity" <sup>1</sup>
<code>pim_reference_data_multiselect</code>	mehrfache Auswahl von "ReferenceEntities"

**Channel, Currency, Locale** Um maximale Flexibilität bei der Verwaltung der Daten zu gewährleisten, können verschiedene "Channels" oder "Scopes" definiert werden. Für jeden "Channel" können die erforderlichen Währungen ("Currencies") und Lokalisierungen ("Locales") hinterlegt werden. [Aken22i]

```

1 {
2   "code": "ecommerce",
3   "currencies": ["USD", "EUR"],
4   "locales": ["de_DE", "en_US", "fr_FR"],
5   "category_tree": "master",
6   "labels": {
7     "en_US": "E-Commerce",
8     // ...
9   }
10 }
```

"Attributes" können als `localizable` definiert werden. Also treten verschiedene Werte je nach gewählter Sprache und Region auf (z.B. der Produktname). Außerdem können sie als `scopable` festgelegt werden. In dem Fall können zu jedem "Channel" zusätzlich nochmal unterschiedliche Werte hinterlegt werden. Bspw. gibt es die Produktbeschreibung in den verschiedenen Sprachen und dazu für jedes Produkt eine kürzere Beschreibung im Channel "mobile" und eine längere im Channel "print". [Aken22g]

**Measurement Family** Für den Attribut-Typ "`pim_catalog_metric`" werden eine Zahl und eine Einheit hinterlegt. Jede Einheit wird einer bestimmten "Measurement Family" zugeordnet. Dort sind alle verfügbaren Einheiten sowie deren Umrechnung ineinander hinterlegt. [Aken22g]

<sup>1</sup>"ReferenceEntities" sind in dieser Arbeit nicht verwendet worden und können daher ignoriert werden.

### 3.2.2 Icecat

Akeneo-PIM ist nur eine Software, in der Produkte strukturiert gespeichert und aufbereitet werden können. Tatsächliche Produktdaten müssen aber erst importiert werden. Eine Möglichkeit wäre die Kreation eines komplett künstlichen Sets an Produkten. Das Ziel dieser Arbeit ist es aber, eine möglichst realitätsnahe Evaluation durchzuführen. Daher wird für den Import von realistischen Produktdaten auf Icecat (<https://icecat.biz/de>) zurückgegriffen.

Icecat ist ein sehr umfangreicher offener Online-Produktkatalog. Über 33.000 Hersteller veröffentlichen hier die Daten ihrer Produkte. Zum heutigen Stand (April 2022) sind über 11 Mio. Produkte bei Icecat gelistet. Viele dieser Daten sind nur für Premium-Nutzer zugänglich. Allerdings gibt es eine ganze Reihe von Unternehmen (u.a. große Player wie Samsung), die als "Icecat-Sposoren" ihre Produktdaten frei zugänglich zur Verfügung stellen. [Icec22a]

Icecat bietet Herstellern damit die Möglichkeit, sehr schnell ihre neuen Produkte zu verbreiten, sodass Shops und Händler direkt die Daten automatisiert in ihr Sortiment aufnehmen können. Zusätzlich werden die Produktdaten nach der UNSPSC-Taxonomy (eine international geläufige Taxonomie zur Definition von Produkteigenschaften) von Icecat standardisiert. [Icec22b]

Aus diesem umfangreichen Fundus wird ein Datenset zur Beantwortung der Kernfrage erstellt. Icecat ist zudem besonders attraktiv, da es einen Importer für Akeneo gibt (<https://marketplace.akeneo.com/extension/akeneo-icecat-connector>), welcher den Import von Produktdaten größtenteils automatisieren soll.

### 3.2.3 Datenset

#### Anforderungen

Für die Auswahl von Produkten werden zunächst einige Anforderungen definiert:

Die Menge an verschiedenen Attributen könnte sich sehr unterschiedlich auf das Clustering auswirken. Daher sollte es sowohl Produkte mit sehr **wenigen** und mit sehr **vielen** Attributen geben.

Daraus folgt, dass Produkte aus **verschiedenen Kategorien** gewählt werden sollten. Als zusätzliche Herausforderung könnten diese Kategorien am besten **miteinander verwandt** sein, sodass die Fähigkeit einer eindeutigen Trennung der Kategorien überprüft werden kann.

Innerhalb einer Produktkategorien sollten **verschiedene Variationen** des gleichen Produktes sowie **verwandte Varianten** (etwa mehrere verschiedene Generationen des Produktes) auftreten.

Zuletzt sollten **Duplikate** enthalten sein. In realen Datensets kommt häufig dasselbe Produkt mehrmals vor, etwa durch geringfügige Unterschiede der Daten beim Import aus verschiedenen Quellen. Ein Clustering-Verfahren sollte in der Lage sein, solche Duplikate zu erkennen.

## Umsetzung

Aus den Anforderungen ist folgendes Vorgehen abgeleitet worden:

Es werden Smartphones der Firma Samsung aus der Galaxy S-Reihe importiert. Hier werden Exemplare der letzten drei Generationen ausgewählt. In jeder Generation gibt es unterschiedliche Varianten (die Standard-Ausführung, “Plus”, “Ultra” und “Fan-Edition”), welche verschiedene Bildschirmgrößen und etwas unterschiedliche Komponenten verbaut haben. [DE22]

Smartphones weisen sehr viele verschiedene Attribute auf und eine einfache Suche auf Icecat zeigte bereits mehrere Duplikate der Samsung-Geräte auf der Plattform.

Als nächstes werden noch Produkte aus der Kategorie “Smartphone-Hüllen” ergänzt. Es werden Hüllen von verschiedenen Herstellern für die besagten Samsung Galaxy Smartphones ausgewählt. Solche Hüllen haben eine viel geringere Menge an Attributen, sind aber trotzdem eng mit den Smartphones im Set verwandt.

Es ist damit sogar denkbar, einige Clustering mit dem Ziel durchzuführen, die Smartphones mit ihren zugehörigen Hüllen in die gleiche Gruppe einteilen zu können.

## 3.3 Clustering

### 3.3.1 Clustering-Verfahren

#### Anforderungen

Um aus den vielfältigen Ansätzen des Clusterings ein geeignetes Verfahren auswählen zu können, werden zunächst einige genauere Anforderungen für die Fragestellung dieser Arbeit definiert:

Ein **hierarchisches Verfahren** ist für diese Arbeit wünschenswert. Es ist bezeichnend, dass Akeneo beliebige Verschachtelungen der “Categories” erlaubt. In der Praxis ist die Einteilung von Produkten in Kategorien stark vom gewünschten Detail-Grad abhängig. Ein hierarchisches Verfahren bildet dieses Verhalten exakter ab. Außerdem müssen partitionierende Verfahren die gesuchte Anzahl an Clustern vorab übergeben bekommen. Damit sind zuerst andere Analysen notwendig, bevor der richtige Wert ermittelt ist. Eine hierarchische Einteilung gibt dem Anwender die Wahl, wie weit aufgefächert die Ergebnisse sein sollen.

Ebenso ist die **Laufzeit** ein wichtiger Faktor, da in der Praxis tendenziell sehr große Mengen an Produkten auftreten können.

Von Vorteil ist weiterhin, wenn das Verfahren mit relativ vielen **verschiedenen Datentypen** umgehen kann. Die meisten vorherigen Transformationen verringern tendenziell den Informationsgehalt der Daten (bspw. die Diskretisierung numerischer Attribute in eine geringere Anzahl an Bändern). [KaRo09, Kap. 1.2.6 Mixed Variables]



## Ansatz

Agglomerative Verfahren weisen immer mindestens eine quadratische Laufzeit auf [Sibs73]. Diverse Ansätze sind dagegen meistens effizienter (siehe Versuche von [RaRa11]) und liefern tendenziell für uns Menschen besser nachvollziehbare Einteilungen. [King15, Kap. 3.3 Agglomerative versus Divisive Clustering]

Das Verfahren Bisecting K-Means wird in dem Zusammenhang als sehr potent angesehen [StKaKu00]. Allerdings muss dieser Ansatz modifiziert werden, um auch mit gemischten Attributen arbeiten zu können. Da zum K-Means eine Variante für gemischte Attribute verfügbar ist (K-Prototypes [Huan98]), wird dieser Ansatz mit dem “Bisecting”-Prinzip kombiniert. Das eingesetzte Verfahren ist also ein **Bisecting K-Prototypes**. Aus der Literatur ist diese Kombination noch nicht bekannt und damit neuartig. Mit diesem Ansatz können sehr viele Arten von Attributen verarbeitet werden. Mehr dazu im folgenden Abschnitt.

### 3.3.2 Distanzfunktion

#### Problemstellung

Grundsätzlich kann K-Prototypes mit gemischten Attributen (numerisch und kategorisch) arbeiten. Die Produktdaten in Akeneo-PIM können allerdings noch weitere Ausprägungen annehmen. Die folgende Tabelle zeigt die grobe Einteilung der Attribut-Typen in Typ-Klassen:

Tabelle 3.2: Einteilung der Akeneo-Typen in übergeordnete Datenklassen

Klasse	Akeneo-Typ
numerisch	pim_catalog_date, pim_catalog_number, pim_catalog_metric, pim_catalog_price_collection
kategorisch	pim_catalog_boolean, pim_catalog_simpleselect, pim_reference_data_simpleselect
multi-kategorisch	pim_catalog_multiselect, pim_reference_data_multiselect
string	pim_catalog_text, pim_catalog_textarea
Datei	pim_catalog_image, pim_catalog_file
sonstige	pim_catalog_identifier

Für die numerischen und kategorischen Attribute muss überprüft werden, ob eine Art “Vorverarbeitung” vor dem Clustering sinnvoll ist. Ansonsten können diese direkt verwendet werden.

Die Klasse “multi-kategorisch” beschreibt die Möglichkeit aus einer gegebenen Liste an Optionen mehrere auswählen zu können. Bspw. könnte eine Liste von Materialien gegeben sein und das jeweilige Produkt markiert alle vorkommenden (z.B. Silikon, PET & Glas). Eine solche Datenklasse ist in der Literatur nicht beschrieben. Der Umgang mit diesen Attributen muss also gesondert erarbeitet werden.

Die “string”-Klasse ist streng genommen klassisch “kategorisch”. Allerdings handelt es sich hier um freie Textfelder (z.B. der Produkttitel), welche bei jedem Produkt völlig frei gefüllt

werden kann. Somit ist die Betrachtung als “Kategorien” nicht zielführend. Wenn bspw. jedes Produkt einen individuellen Titel hat, dann gibt es genau so viele “Kategorien” wie Produkte. Dies ist keine sinnvolle Form der Datenverarbeitung. Auch für diese Klasse muss eine gesonderte Art des Umgangs gefunden werden.

Die Klasse “Datei” wird im Rahmen dieser Arbeit ignoriert. Die Analyse von Bildern oder Textdokumenten ist ein weites Feld mit vielen verschiedenen Ansätzen. Die tatsächliche Relevanz bspw. eines Produktbildes für das Clustering ist aber fraglich. In der Theorie müssten alle Eigenschaften eines Produktes in den anderen Attributen ebenfalls abgebildet sein. Im Bild liegen diese Information aber äußerst unstrukturiert vor, wenn überhaupt.

Der Akeneo-Typ “pim\_catalog\_idenfier” ist die Id eines Produktes. Sie hat keine Relevanz für das Clustering. Ebenso können in Akeneo Attribute als **unique** gekennzeichnet werden. Dies ist sinnvoll für das Speichern mehrerer verschiedener Identifier (also in Akeneo wird das besagte Identifier-Attribut genutzt, aber die Id im ERP-System ist eine andere, die hier ebenfalls hinterlegt ist). Diese Identifier geben aber keine Ähnlichkeitsinformationen, sondern sind rein logistische Werte. Sie werden im Clustering stets ignoriert werden.

Ein weiteres Problem ist, dass die Definition der Attribut-Anforderungen in den Akeneo-Families keinen bindenden Charakter haben. Das heißt, jedes Produkt kann Werte für jedes beliebige Attribut aufweisen oder auch nicht. Der Umgang mit **null**-Values wird also ebenfalls eine zentrale Rolle einnehmen.

## Ansatz

**numerische Attribute** Viele der numerischen Attribute enthalten ihre Daten auf eine implizite Art und Weise (z.B. ein Datum). Die folgende Tabelle zeigt für die verschiedenen Typen in Akeneo, ob und wie diese Daten extrahiert werden.

Tabelle 3.3: Vorverarbeitung der numerischen Attribute in Akeneo

Akeneo-Typ	Vorverarbeitung
pim_catalog_date	Umwandlung in Unix-Timestamp, Normalisierung
pim_catalog_number	Normalisierung
pim_catalog_metric	Umrechnung in Standard-Unit des Attributs, Normalisierung
pim_catalog_price_collection	Filter nach einer Währung z.B. USD, Normalisierung

Die Verarbeitungsschritte sind recht selbsterklärend. Alle Attribute werden auf das Intervall zwischen  $[0, 1]$  normalisiert, um eine stärkere Gewichtung von Attributen mit tendenziell höheren Zahlen (z.B. Unix-Timestamps) zu vermeiden. Für die Normalisierung werden nur die tatsächlich vorkommenden Werte genutzt. Werte, welche in den Constraints der Akeneo-Attribute definiert sind (z.B. **date\_min** und **date\_max**), werden nicht betrachtet.

$$x^i = \frac{x^i - \min X^i}{\max X^i - \min X^i} \quad (3.1)$$

**kategorische Attribute** Es könnte bei ordinalen Attributen sinnvoll sein, diese u.U. als numerische Attribute anzusehen. Allerdings geben die Daten in Akeneo keinen direkten Rückschluss her, ob es sich z.B. bei einem Single-Select eigentlich um ein ordinales Attribut handelt. Somit müssten hier alle Attribute (knapp hundert) händisch analysiert werden, was den Rahmen dieser Arbeit weit gesprengt hätte.

Der K-Prototypes verlangt keine spezielle Vorverarbeitung kategorischer Attribute. Es können aber jederzeit `null`-Werte in den Daten vorkommen, weswegen der Jaccard-Koeffizient als Ähnlichkeitsmaß zu bevorzugen ist. Außerdem ist zu beachten, dass kategorische Attribute auf ihre Ähnlichkeit und numerische auf ihre Distanz überprüft werden. Da die numerischen im Intervall  $[0; 1]$  liegen, können die Ergebnisse der Ähnlichkeitsmaße einfach invertiert werden.

$$d(x_1^{cat}, x_2^{cat}) = 1 - \frac{|x_1^{cat} \cap x_2^{cat}|}{|x_1^{cat} \cup x_2^{cat}|} \quad (3.2)$$

**multi-kategorische Attribute** Der naheliegendste Ansatz besteht darin, die verschiedenen auftretenden Kombinationen an gewählten Optionen in eigene Kategorien zu fassen und sie wie normale kategorische Attribute zu behandeln. Dies geht allerdings mit einem Verlust an Informationen einher: Angenommen ein Produkt besteht aus den Materialien {silicone, pet} und ein anderes aus {silicone, glass}. Beide würden nun unterschiedlichen Kategorien zugeordnet und ihre Ähnlichkeit ist 0, obwohl sie zumindest eines der Materialien gemeinsam haben. Besser wäre, wenn dieses einzelne Attribut als ganzes z.B. mittels Jaccard-Koeffizient analysiert werden würde. Hier würde eine Ähnlichkeit von  $\frac{1}{3}$  herauskommen.

Im Unterschied zu normalen kategorischen Attributen, wo die Ähnlichkeit über alle Attribute zusammen errechnet wird, könnte für multi-kategorische Attribute also die Ähnlichkeit zwischen den Werten für jedes Attribut einzeln ermittelt und aufsummiert werden. Daraus ergibt sich dann die gesamte Ähnlichkeit der beiden Datenpunkte.

Dieser Ansatz ist neuartig und so noch nicht beschrieben worden. Daher wird er im Rahmen dieser Arbeit mit dem naheliegenderem erstgenannten Ansatz verglichen werden.

**String-Attribute** Für diese Attribute gibt sehr vielfältige Ansätze:

Die einfache Verwendung als kategorische Attribute fällt, wie bereits in der Problemstellung dargelegt, weg.

Eine weitere Möglichkeit wäre der Vergleich mittels String-Metrics (wie Jaro-Winkler oder Levenstein-Distance). Dieser Ansatz birgt ein Hauptproblem: Der K-Prototypes-Algorithmus berechnet für jedes Cluster einen Mittelpunkt. Die String-Metrics sind aber nur für einen paarweisen Vergleich von Strings geeignet. Ein "Mittelpunkt" kann hieraus nicht abgeleitet werden. Die Verwendung des Modus (wie bei kategorischen Attributen) scheidet ebenfalls aus. Wenn jeder Produkttitel individuell ist, dann ist der Modus immer 1. Dieser Ansatz funktioniert für das gewählte Clustering-Verfahren also nicht ohne weiteres.

Schließlich besteht der Ansatz, mit Tokenization zu arbeiten. In der Literatur wird dieser Ansatz aber lediglich für Datensets beschrieben, deren Datenpunkte aus ausschließlich einem

String-Wert bestehen. Datensets mit mehreren String-Attributen oder in gemischter Form sind hingegen noch nicht zusammen verarbeitet worden.

Zuvor wurde ein Ansatz zur Evaluation multi-kategorischer Attribute hergeleitet. Dieser Ansatz könnte für Strings ebenfalls verwendet werden. Zerlegt man einen solchen String in Tokens, so erhält man eine Art multi-kategorischen Wert. Bsp.: aus “Samsung Galaxy S20 128GB” wird {samsung, galaxi, s20, 128gb}. Solche Tokens lassen sich wieder mittels Jaccard-Koeffizienten für jedes String-Attribut separat vergleichen und die Ergebnisse aufsummieren.

Auch dieser Ansatz wird mit der Verwendung der Strings als einfache kategorische Attribute verglichen werden.

### Mathematische Formulierung

Aus den genannten Ansätzen lässt sich insgesamt folgende Formell für die finale Distanz-Funktion ableiten:

$$d(x_1, x_2) = \frac{d_{num}(x_1, x_2) + |x_1^{num_{null}}| + |x_2^{num_{null}}| + n_{cat} \cdot d_{cat}(x_1, x_2) + d_{mul}(x_1, x_2)}{|attributes \text{ in } x_1 \cup x_2|} \quad (3.3)$$

$$d_{num}(x_1, x_2) = \sum_{i \in num} |x_1^i - x_2^i| \quad (3.4)$$

$$d_{cat}(x_1, x_2) = 1 - \frac{|x_1^{cat} \cap x_2^{cat}|}{|x_1^{cat} \cup x_2^{cat}|} \quad (3.5)$$

$$d_{mul}(x_1, x_2) = \sum_{i \in mul} 1 - \frac{|x_1^i \cap x_2^i|}{|x_1^i \cup x_2^i|} \quad (3.6)$$

Die numerischen Attribute werden mittels Manhattan-Distanz verrechnet. Da die Attribute vorher normalisiert worden sind, kann so maximal eine Distanz von 1 je numerischem Attribut entstehen. Die kategorischen Attribute werden mit dem beschriebenen inversen Jaccard-Koeffizienten berechnet (da asynchron). Der Koeffizient wird außerdem mit der Anzahl an kategorischen Attributen  $n_{cat}$  multipliziert, um ihn mit den anderen Metriken gleich zu gewichten. Die multi-kategorischen Attribute werden jeweils einzeln mittels inversem Jaccard-Koeffizienten verglichen.

Wie bereits ausführlich dargelegt, können in den Produktdaten von Akeneo immerzu `null`-Values vorkommen. Die kategorischen und multi-kategorischen Distanzmaße können dank des Jaccard-Koeffizienten problemlos damit umgehen. Die Minkowski-Metriken sind allerdings nur für tatsächlich vorhandene numerische Werte in beiden Produkten definiert. Daher wird  $d_{num}$  ausschließlich in diesem Fall aufgerufen. Für den Fall, dass `null`-Values in den numerischen Attributen von einem der beiden Produkte vorkommen, wird für jedes dieser Attribute 1 addiert. Die Attribute sind sich ja maximal unähnlich, da das eine Produkt es definiert und das andere nicht. In der Formel ist das mit  $|x_1^{num_{null}}|$  und  $|x_2^{num_{null}}|$  hinterlegt.

Der Divisor  $|attributes \text{ in } x_1 \cup x_2|$  sorgt für eine Normalisierung der Distanz in das Intervall  $[0; 1]$ . Dadurch werden Unterschiede zwischen Produkten, welche alleine aus der verschiedenen Anzahl an definierten Attributen entstehen, ausgeglichen.

Eine vereinfachte (serialisierte) Form dieser Funktion sieht folgendermaßen aus:

$$d(x_1, x_2) = \frac{\sum d'(x_1^i, x_2^i)}{|attributes \text{ in } x_1 \cup x_2|} \quad (3.7)$$

$$d'(x_1^i, x_2^i) = \begin{cases} 1 & , x_1^i \text{ is null} \vee x_2^i \text{ is null} \\ |x_1^i - x_2^i| & , i \text{ is numerical} \\ 0 & , i \text{ is categorical} \wedge x_1^i = x_2^i \\ 1 & , i \text{ is categorical} \wedge x_1^i \neq x_2^i \\ 1 - \frac{|x_1^i \cap x_2^i|}{|x_1^i \cup x_2^i|} & , i \text{ is multi - categorical} \end{cases} \quad (3.8)$$

## 3.4 Evaluation

### 3.4.1 Kriterien

Das hergeleitete Clustering-Verfahren in seinen Varianten sollte auf seine Validität überprüft werden. Speziell wird getestet, ob mit diesem Verfahren "sinnvolle" Cluster gefunden werden. Die verschiedenen Aspekte dieser Sinnhaftigkeit werden nun anhand von drei Hauptkriterien definiert: Stabilität, Qualität und Erkennungsfähigkeit.

#### Stabilität

Der K-Prototypes-Algorithmus nutzt wie alle Verfahren dieser Klasse ein Initialisierungsverfahren, welches auf dem Zufall beruht. Da es sich um ein klassisches Minimierungsverfahren mit eventuellen lokalen Minima handelt, können mehrmalige Durchläufe über das gleiche Datenset verschiedene Clusterzuteilungen finden. Ein Verfahren, welches keinerlei Determinismus aufweist und je nach Uhrzeit komplett andere Ergebnisse liefert, ist allerdings in der Praxis wenig zu gebrauchen. Zudem sollte eine wohldefinierte Distanzfunktion in der Lage sein, die Datenpunkte eindeutig genug voneinander zu trennen, sodass trotz verschiedener Startpunkte die Zuteilung in Cluster stets ähnlich abläuft.

Zur Prüfung der Stabilität wird also wie folgt vorgegangen: Das Clustering wird stets mehrmals hintereinander ausgeführt. Anschließend wird die Ähnlichkeit der gefundenen Cluster mittels Adjusted-Rand-Index berechnet. Da ein hierarchisches Verfahren verwendet wird, wird jede Hierarchie-Ebene der verschiedenen Durchläufe betrachtet und anschließend der Durchschnitt aus allen Ähnlichkeitsmessungen über alle Hierarchie-Stufen und alle Durchläufe berechnet. Die Ähnlichkeit der Cluster sollte dabei nahe 100% sein.

## Qualität

Ziel des Clusterings ist es, die Datenpunkte in wohl-separierte Gruppen zu sortieren. Dies ist zum einen wichtig, um mit den Ergebnissen überhaupt weiterarbeiten und belastbare Aussagen zu den Gruppierungen finden zu können. Zum anderen sind Cluster von hoher Qualität aber auch ein Garant für eine gewisse Resilienz vor neuen Datenpunkten, welche in Zukunft zum Datenset hinzugefügt werden. Mit jedem neuen Datenpunkt verschieben sich die bisherigen Clusterschwerpunkte geringfügig. Liegen die Cluster nun sehr nahe beieinander, ändert sich dadurch u.U. auch die Clusterzuordnung der älteren Punkte.

Daher wird ein gefundenes Clustering-Ergebnis mittels eines internen Index auf seine Qualität überprüft. Zum Einsatz können entweder der Silhouetten-Koeffizient oder Davies-Bouldin-Index kommen. Um bei der Evaluation keine zusätzlichen Fehlerquellen zu erzeugen, wird für die Berechnung der Metriken auf externe Bibliotheken zurückgegriffen werden. Es wird dabei der Index zum Einsatz kommen, der besser nutzbar ist.

Da das Clustering ein hierarchisches Verfahren verwendet, wird der interne Index für jede sinnvolle Hierarchie-Stufe ( $2 \leq k \leq n$ ) berechnet und anschließend der Durchschnitt gebildet.

## Erkennungsfähigkeit

Stabile und wohl-separierte Cluster zu finden, sind sehr sinnvolle Kriterien. Allerdings bewerten sie eher das Clustering an sich ohne einen wirklichen Bezug zur Realität. Dies soll mit diesem dritten Kriterium umgesetzt werden.

**Generationen und Modelle** In dem erstellten Datenset kommen objektiv erkennbare natürliche “Gruppen” vor. Die verschiedenen Generationen der Smartphones sowie die verschiedenen Modelle innerhalb einer Serie sind für uns Menschen offensichtliche Unterscheidungsmerkmale dieser Produkte. Daher sollte das Clustering-Verfahren ebenfalls in der Lage sein, diese Unterteilung zu finden.

Konkret werden die Generationen und Modelle in den “Akeneo-Categories” hinterlegt werden. Nach einem Cluster-Durchlauf werden anschließend die Hierarchie-Ebenen für die jeweiligen Kategorien abgefragt (z.B. wenn es drei Generationen im Datenset gibt, dann sollte das Clustering bei  $k = 3$  jedes Produkt der gleichen Generation in die gleiche Gruppe positioniert haben). Der Vergleich der Übereinstimmung mit “Akeneo-Categories” und Clustering-Ergebnis erfolgt über den Adjusted-Rand-Index.

**Duplikate** Außerdem befinden sich unter den Smartphones einige Duplikate. Diese werden ebenfalls mit einer entsprechenden “Category” in Akeneo markiert. Anschließend wird geprüft, ob die Duplikate über alle Hierarchie-Ebenen stets dem gleichen Cluster zugeordnet worden sind (was man von einem sinnvollen Clustering-Verfahren erwarten würde). Je nach Implementierung könnte hier der Jaccard-Koeffizient zum Einsatz kommen. Der Vergleich erfolgt nun über die Menge an zugeteilten Clustern beider Produkte. Diese sollte bei beiden sehr ähnlich sein und der Koeffizient entsprechend eine Ähnlichkeit nahe der 1 feststellen.

### 3.4.2 Aspekte

Für die Evaluation spielen eine Reihe von Teilaspekten bei der Auswertung eine besondere Rolle:

#### Verarbeitung multi-kategorischer Attribute

Im vorherigen Abschnitt ist ein alternativer Ansatz zur Verarbeitung multi-kategorischer Attribute vorgestellt worden, welcher mit weniger Informationsverlust einhergeht. Daher sollte diese Art der Verarbeitung bessere Cluster produzieren, als wenn die multi-kategorischen Attribute in normale kategorische Attribute umgewandelt werden.

Zusätzlich kann diese Art der Verarbeitung auch auf String-Attribute angewendet werden, welches ebenfalls zu besseren Ergebnissen führen sollte.

#### Auswahl der Attribute

Produkte in einem PIM-System weisen gerne mehrere hundert Attribute auf. Dadurch stellt sich die Frage, wie sich die Menge an Attributen auf das Clustering auswirkt. Dieser Einfluss wird zum einen mit den verschiedenen Produktfamilien (Smartphones und Hüllen) überprüft. Zum anderen könnte aber auch das gezielte Weglassen von vorhandenen Attributen ebenfalls die Ergebnisse verändern. Dabei sind verschiedene Ebenen denkbar:

Manche Typen von Attributen könnten wichtiger sein als andere. Z.B. stecken in String-Attribute potenziell mehr Informationen als in einem einfachen kategorischen Attribut. Andererseits könnte die "Unstrukturiertheit" der Strings diese Informationen verwaschen. Daher werden die **verschiedenen Typen** in unterschiedlichen Kombinationen geclustert und verglichen.

Über die Families in Akeneo können Attribute als **optional oder erforderlich** gekennzeichnet werden. Attribute mit vielen **null**-Werten könnten für das Clustering womöglich keine Rolle spielen. Daher werden die Cluster mit und ohne Verwendung optionaler Attribute überprüft.

Als letztes wird überprüft, ob eine **menschliche "Vorauswahl"** der Attribute sinnvollere Ergebnisse liefern kann. Um den Rahmen dieser Arbeit nicht komplett zu sprengen, wird der Autor die Auswahl nach persönlichem Ermessen treffen. Es ist aber denkbar, in Zukunft z.B. externe Statistiken heranzuziehen, um vor allem Attribute zu verwenden, welche für Kunden von besonderer Relevanz sind.

#### Gewichtung der Attribute

In der gesamten bisherigen Herleitung ist stets die "Gleichgewichtung" der Attribute angestrebt worden (z.B. durch Normalisierung der numerischen Attribute etc.). Es ist aber denkbar, dass der komplette Ausschluss von Attributen mit zu viel Verlust an Informationen einhergeht. Daher wird gesondert überprüft, ob sich bessere Cluster bilden, wenn bestimmte Attribute (z.B. die menschliche "Vorauswahl" im vorherigen Absatz) im Verhältnis zu den anderen übergewichtet werden.

Die Übergewichtung lässt sich bewerkstelligen, indem die entsprechenden Attribute im Datenset während der Vorverarbeitung dupliziert werden.

### 3.4.3 Vorgehen

Die genannten Aspekte werden mit Hilfe der definierten Kriterien und Metriken evaluiert. Das Vorgehen ist dabei wie folgt:

Als erstes werden nur die “Smartphone-Hüllen” geclustert und in den genannten Aspekten überprüft. Da hier die Anzahl an Attributen überschaubar ist, können Fehler in der Implementierung leichter identifiziert und verbessert werden. Auch lässt sich der Einfluss einzelner Attribute auf das Endergebnis leichter bewerten.

Diese initialen Ergebnisse werden nun mit dem Datenset, welches nur aus den “Samsung Smartphones” besteht, gegengeprüft. Hier kommen deutlich mehr Attribute vor, sodass interessant zu sehen sein wird, ob sich die Ergebnisse aus “einfacheren” Produkten auch auf komplexere übertragen lassen.

Schließlich werden alle Produkte (Smartphones und Hüllen) gleichzeitig geclustert mithilfe der zuvor gewonnen Erkenntnisse (bspw. welche Attribut-Typen oder Gewichtungen die besten Ergebnisse geliefert haben etc.). Ziel hierbei ist es, dass die Ergebnisse des Clusterings der Teilsets und des Gesamtsets möglichst identisch sind. Ist das der Fall, so ist das gefundene Clustering-Verfahren tatsächlich “generisch”, da nicht einmal eine vorherige Trennung der Produktfamilien nötig ist.

Eine letzte Teilfrage wird in diesem Zusammenhang ebenfalls evaluiert: Wird das Clustering nur mit Attributen durchgeführt, welche in beiden Familien vorkommen, so könnten u.U. die “passenden” Smartphones und Hüllen in gemeinsame Gruppen sortiert werden. Dieser Versuch stellt eher eine Spekulation dar. Die Überprüfung ist in diesem Rahmen aber leicht durchführbar und bildet damit den Abschluss der Evaluation.



## 4 Implementierung

### 4.1 Überblick

Nach der Konzeption folgte die Umsetzung und Implementierung des Praxisteils. Für eine bessere Übersicht ist in der folgenden Grafik die Architektur in detaillierterer Form inklusive implementierter Klassen und sonstigen Software-Komponenten dargestellt.

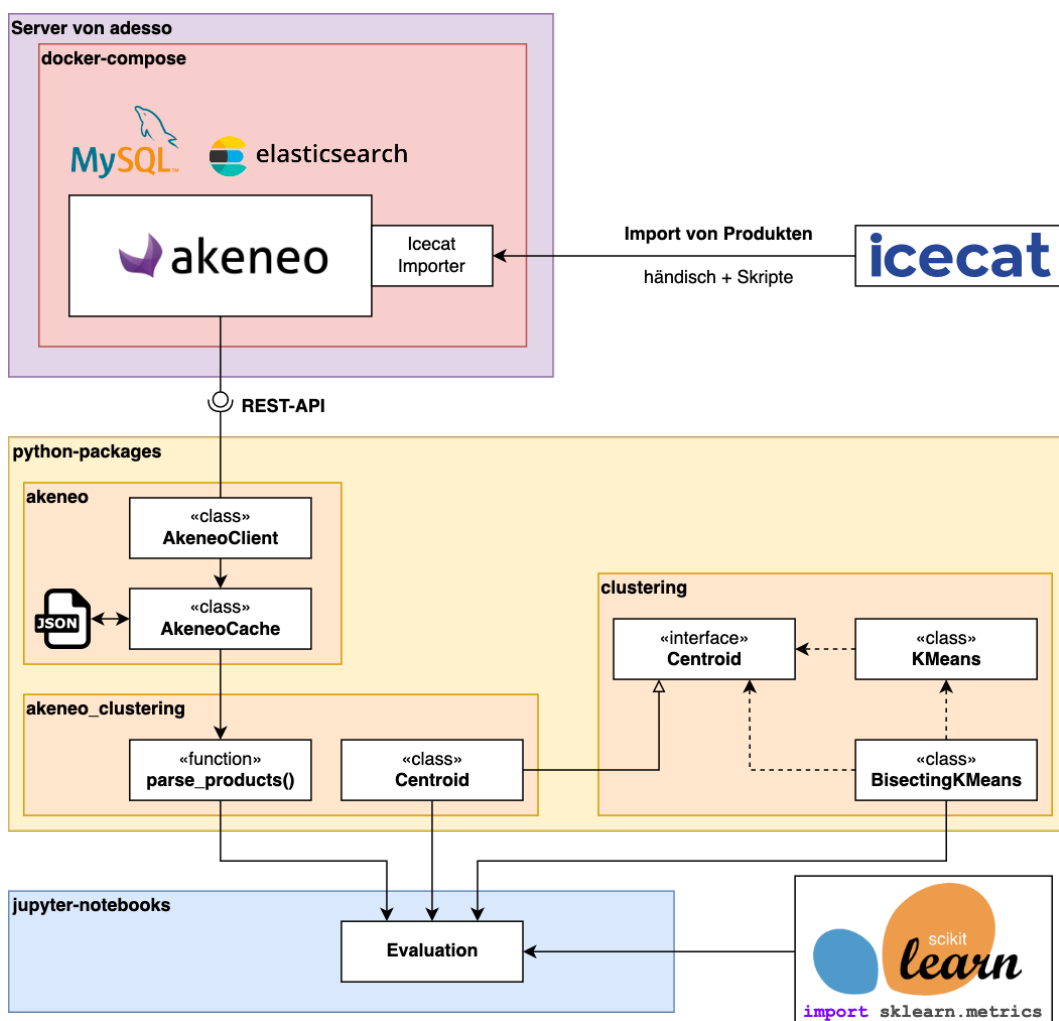


Abbildung 4.1: Detaillierte Architektur der praktischen Umsetzung

adesso stellte für diesen Teil einen Server bereit, welcher für das Hosting von Akeneo-PIM genutzt wurde. Anschließend erfolgte die Installation von Akeneo-PIM Community Edition Version 5.0 auf diesem Server. Dazu wurde die offizielle Installationsanleitung von Akeneo unter Verwendung der Containerization-Lösung Docker (<https://www.docker.com/>)

befolgt [Aken22d]. Zusätzlich wurde das Akeneo-Plugin “Akeneo Icecat Connector” Version 2.0.0 [Aken22j] in die Instanz integriert. Das kostenpflichtige Plugin wurde von adesso gesponsert.

Nun musste Akeneo-PIM mit Produktdaten gefüllt werden, welche aus dem Online-Katalog Icecat stammen. Eine genaue Übersicht zur Auswahl der Produkte sowie der weiteren Aufbereitung innerhalb von Akeneo siehe Abschnitt Datenset.

Anschließend erfolgte die Implementierung diverser Klassen und Packages, welche das hergeleitete Konzept umsetzen oder wichtige Hilfsfunktionalitäten für die spätere Evaluation liefern. Alle diese Komponenten sind in der Programmiersprache Python (<https://www.python.org/>) implementiert worden. Python ist sehr weit verbreitet für Aufgaben der Datenanalyse bzw. Data Science allgemein. Das liegt daran, dass es eine Vielzahl nützlicher Bibliotheken für die Analyse und Aufbereitung von Daten gibt. Ebenso sind Implementierungen vieler Algorithmen und Verfahren in Python verfügbar [PWMO19, Kap. 2.4.2 Programmierung]. Zu den meisten umgesetzten Elementen ist ebenfalls grundlegendes Unit-Testing durchgeführt worden, um die korrekte Funktionalität zu prüfen.

Das Package **akeneo** liefert zwei Hauptkomponenten. Der **AkeneoClient** kommuniziert mit der REST-API von Akeneo zum Abrufen der hinterlegten Daten. Ebenso konnten damit verschiedene Aufgaben, wie das Zuordnen der Produkte zu ihren passenden Kategorien teilweise automatisiert werden. Der **AkeneoCache** nutzt den **AkeneoClient**, um alle Endpunkte, welche Daten zurückgeben, abzufragen. Die JSON-Responses dieser Anfragen werden anschließend in JSON-Dateien gespeichert. Die REST-Anfragen dauern mitunter recht lange (mehrere Sekunden), allerdings änderte sich das Datenset nach der Erstellung nicht mehr. Durch diese Zwischenspeicherung wurde die Evaluation erheblich beschleunigt, da die Daten direkt aus den Dateien gelesen werden konnten. Der **AkeneoCache** ist ebenso für das Laden der Daten zuständig. Dazu werden die JSON-Objekte in Python-Datenstrukturen überführt. Dazu kam die Bibliothek **dacite** (<https://github.com/konradhalas/dacite>) zum Einsatz.

Zunächst wurde überprüft, ob externe Clustering-Bibliotheken in der Lage sind, das erarbeitete Konzept umzusetzen. Da keine Bibliothek den Anforderungen genügte, wurde im Package **clustering** eine generische Version des **KMeans** und **BisectingKMeans** implementiert. Sie nutzen ein allgemeines Interface **Centroid**, welches für eine konkrete Clustering-Anwendung vorher implementiert werden muss. Genauere Details dazu in Abschnitt Clustering.

Das Package **akeneo\_clustering** bringt nun die beiden anderen Packages zusammen. Die Funktion **parse\_products()** liest die Daten aus dem Cache aus und bereitet die Produkte für das Clustering auf. Dabei werden zum Beispiel die beschriebenen Vorverarbeitungen für numerische und String-Attribute durchgeführt. Die **Centroid**-Klasse implementiert das Interface für das **clustering**-Package. Hier ist die erarbeitete Distanzfunktion hinterlegt, ebenso der genaue Prozess, wie Mittelpunkte zu den jeweiligen Clustern berechnet werden. Weitere Details im Abschnitt Clustering

Abschließend fand die Evaluation mithilfe von Jupyter-Notebooks statt. Das sind Source-Code-Dateien, die in einzelne Code-Zellen unterteilt sind. Mithilfe eines Webfrontends, welches Jupyter mitliefert, können die Notebooks interaktiv verändert und beliebig einzelne oder mehrere Code-Zellen ausgeführt werden. Die Ausgaben der Zellen erscheinen direkt darunter. Dadurch eignet sich Jupyter für Analysen, in denen wiederholt Versuche und

leichte Abwandlungen dieser durchgeführt werden. Die direkte Visualisierung beschleunigt den Evaluationsprozess [PWMO19, Kap. 2.4.2 Programmierung]. Um die Berechnung der Metriken möglichst fehlerfrei durchführen zu können, ist auf die umfangreiche Sammlung implementierter Metriken von scikit-learn zurückgegriffen worden. Näheres im Abschnitt Evaluation.

## 4.2 Dataset

### 4.2.1 Attribute

Wie bereits beschrieben, müssen die Attribute in Akeneo zu erst existieren, bevor ein Produkt einen Wert darin aufweisen kann. Icecat definiert ebenfalls eine sehr umfangreiche Liste an Icecat-Attributen. Diese können über den Icecat-Importer ausgewählt und in Akeneo importiert werden. Dabei werden die Icecat-Typen entsprechend auf äquivalente Akeneo-Attribut-Typen abgebildet. Dieser Prozess läuft grundsätzlich automatisch über den Importer. Allerdings müssen dazu vorher per Hand in der Weboberfläche des Importers alle Attribute ausgewählt werden, welche es zu importieren gilt.

Icecat stellt für jede Produktkategorie eine eigene Taxonomie zur Verfügung, welche beschreibt, was für Attribute in den Produkten der jeweiligen Kategorie vorkommen können und ob sie erforderlich oder optional sind. Entsprechend sind die Taxonomien für “mobile\_phone\_cases” und “smartphones” heruntergeladen worden. Die Excel-Dateien finden sich im angehängt Git-Repository im Ordner `cluster-analysis > data > icecat-taxonomy_final`. Mittels dieser Dateien sind per Hand im Importer alle benötigten Attribute ausgewählt und importiert worden.

Anschließend sind nach dem Vorbild der Icecat-Taxonomien in Akeneo 2 “Families” (eine für die Hüllen und eine für die Smartphones) angelegt worden. Über die “Family” kann in Akeneo festgelegt werden, welche Attribute bei Produkten dieser Art vorkommen können sowie ob sie erforderlich oder optional sind. Dieser Prozess ließ sich weitestgehend per Skript lösen. Im Repository im Ordner `cluster-analysis > reports > dataset` sind die ausgeführten Schritte, samt Code in PDF-Dateien hinterlegt.

Es folgten ein paar kleinere weitere Schritte, wie die Strukturierung der Attribute in Gruppen zur besseren Übersicht. Diese sind aber nicht weiter von Belang.

### 4.2.2 Produkte

Als nächstes sind Produkte für den Import ausgewählt worden. In der kostenlosen Version von Icecat stehen nur Produkte von einigen wenigen Herstellern (sog. Sponsoren) zur Verfügung. Zu diesen Sponsoren zählen auch Samsung und einige Hersteller von Smartphone-Hüllen für Samsung-Smartphones. Über die Suchfunktion von Icecat sind nun Samsung-Smartphones der S-Reihe aus den Generationen S20, S21 und S22 gesucht und ausgewählt worden – ebenso zu den Modellen passende Hüllen. Im angehängten Git-Repository gibt es den Ordner `cluster-analysis > data > dataset`. Dieser enthält mehrere CSV-Dateien, welche verschiedene Daten enthalten, die später in Akeneo importiert wurden. Die Datei

`products.csv` enthält alle ausgewählten Produkten mit ihrem jeweiligen Link zu Icecat. Außerdem ist zu jedem Produkt hinterlegt, zu welcher “Family” (Hülle oder Smartphone) es gehört. Außerdem sind die Produkte verschiedenen “Categories” zugeordnet worden. Über diese Categories ist hinterlegt, zu welchem Smartphone-Modell das Produkt gehört. Ebenso ist mit entsprechenden Categories vermerkt, ob zwei Produkte Duplikate voneinander sind. Die folgende Tabelle gibt eine Übersicht über die 122 ausgewählten Produkte:

Tabelle 4.1: Importierte Produkte nach Smartphone-Modell

Modell	Hüllen	Smartphones	davon Duplikate <sup>1</sup>
S20	18	5	2
S20+	14	5	0
S20 Ultra	11	4	2
S20 FE	2	3	0
S21	11	7	4
S21+	10	4	2
S21 Ultra	5	6	2
S21 FE	5	4	0
S22	2	2	0
S22+	1	1	0
S22 Ultra	1	1	0
<i>gesamt:</i>	<i>80</i>	<i>42</i>	<i>12</i>

Schließlich ist aus der Icecat-URL die SKU und EAN der Produkte ausgelesen und per Skript in Akeneo jeweils als neues Produkt eingefügt worden. Danach wurde im Icecat-Importer der **EnrichProducts**-Job ausgeführt, welcher die restlichen noch leeren Attribute der Produkte mit den Daten aus Icecat füllt.

### 4.2.3 Korrekturen

Nach dem Import der Attribute und Produkte wurden die Daten analysiert und auf Fehler geprüft. Dabei traten eine ganze Reihe von Problemen zutage:

- Alle 31 Attribute, welche in Icecat als Multi-Select definiert sind, wurden in Akeneo als Single-Select importiert. Unter den Labels des Attributs “Material” finden sich z.B. die Werte “Silicone, Thermoplastic polyurethane (TPU)” sowie “Thermoplastic polyurethane (TPU), Silicone”. Also die gleiche Information als zwei verschiedene Labels.
- 22 numerische Attribute warfen beim Import Fehler, weshalb diese schließlich als Textzeilen importiert werden mussten.
- 10 Single-Selects sind automatisch als Textzeilen importiert worden.

Diese Fehler wurden anschließend per Skript gefixt. Dazu wurde jedes fehlerhafte Attribut ein zweites Mal in korrigierter Version in Akeneo angelegt. Anschließend wurde jedes Produkt durchgegangen und die Werte aus den fehlerhaften Attributen korrigiert und in den neuen Attributen gespeichert. Die Werte der Multi-Selects enthielten die verschiedenen

<sup>1</sup>Es kommen nur Duplikate von Smartphones vor.

Optionen als Komma-getrennte Liste, welche entsprechend aufgeteilt worden ist. Die fehlerhaften numerischen Attribute und Single-Selects konnten ohne Problem direkt auf den richtigen Typ übertragen werden.

Zum Schluss sind alle fehlerhaften Attribute in eine Attribut-Gruppe names “Faulty” sortiert worden. Dadurch können sie in der Evaluation direkt herausgefiltert werden, sodass nur die korrekten Attribute bei der Verarbeitung übrig bleiben.

Etwas später wurde noch offenkundig, dass alle numerischen Attribute mit einer “MeasurementUnit” ebenfalls fehlerhaft sind. Die Einheit ist falsch importiert worden, sodass bspw. die Smartphones zwischen 5 und 6 Kilogramm wiegen. Da dieser Fehler aber bei allen Attributen “konsistent” aufgetreten ist und die numerischen Attribute im Zuge der Vorverarbeitung sowieso normalisiert werden, kann dieser Fehler ignoriert werden.

Tabelle 4.2: Anzahl an Attributen je Attribut-Klasse und Produktfamilie

Attribut-Klasse	Hüllen		Smartphones		davon in beiden
	<i>erforderlich</i>	<i>optional</i>	<i>erforderlich</i>	<i>optional</i>	
numerisch	1	22	10	106	10
kategorisch	3	16	19	157	2
multi-kategorisch	1	4	3	26	3
strings	5	5	6	27	9
andere	5	0	4	2	4

Die Tabelle zeigt die jeweilige Menge an Attributen für die Hüllen und die Smartphones nach der Durchführung der Korrekturen.

## 4.3 Clustering

### 4.3.1 Überblick zu externen Libraries

Für Python existieren eine ganze Reihe an Bibliotheken für das maschinelle Lernen. Diverse Verfahren, welche in der Literatur beschrieben wurden, sind darin praktisch implementiert. Daher ist zuerst geprüft worden, ob eine der existierenden Lösungen bereits für die Clustering-Aufgabe verwendet werden kann.

Die Bibliothek “PySpark” von Apache [Foun22] ist eine der wenigen, die eine Implementierung für den Bisecting-K-Means-Algorithmus zur Verfügung stellt. Das originale Verfahren von Steinbach et al. [StKaKu00] ist nur für numerische Attribute ausgelegt gewesen. Die Implementierung von Apache ist es entsprechend ebenfalls. Auch die Verwendung von null-Values im Datenset funktioniert mit dieser Bibliothek nicht, sodass künstliche Werte eingefügt werden müssten, welche vor allem die Berechnung des Durchschnitts für den Centroid verzerren.

Für den K-Means und den K-Prototypes existieren ebenfalls Implementierungen, welche vielleicht als Grundlage für eine eigenen Implementierung in der “Bisecting-Variante” hätten dienen können.

Eine der größten Bibliotheken für das Machine Learning – scikit-learn – bietet nur den klassischen K-Means an und ist ebenfalls nicht in der Lage `null`-Values zu verarbeiten [scik22]. Für das Clustering der Produktdaten ist diese Bibliothek also ebenfalls ungeeignet. Allerdings ermöglicht sie zusätzlich die Berechnung diverser Metriken wie den Adjusted-Rand-Index oder den Silhouetten-Koeffizienten. Diese sind für die Evaluation verwendet worden.

Die einzige gepflegte Implementierung des K-Prototypes stammt von Nico de Vos [Vos22]. Wie alle Verfahren, kann auch diese Variante nicht mit `null`-Values umgehen. Da die Distanzfunktionen per Parameter übergeben werden, hätte die erarbeitete Berechnung der multi-kategorischen Attribute mit dieser Bibliothek wahrscheinlich umgesetzt werden können. Auf die Ermittlung des Mittelpunktes kann aber im Gegensatz dazu kein Einfluss genommen werden. Schlussendlich wurde auch diese Lösung verworfen.

Das Clustering wurden daraufhin selbst auf eine möglichst generische Art und Weise implementiert. Dabei dienten vor allem scikit-learn und die Implementierung von Nico de Vos als Vorbild.

### 4.3.2 Clustering-Library

#### Centroid-Interface

Das Ziel bei der Implementierung war es, eine möglichst flexible Lösung zu bauen, sodass in der Auswertung beliebige Varianten des Clusterings ausprobiert werden können. Der grundlegende Ablauf des K-Means ändert sich eigentlich nicht. Unterschiede treten vor allem in der Distanzfunktion auf und wie aus den Datenpunkten ein Mittelpunkt errechnet wird. Dadurch entstand die Idee, das Verfahren zu umzusetzen, dass diese Aspekte beliebig ausgetauscht werden können, der Rahmen-Ablauf aber bestehen bleibt.

Es entstand das **Centroid**-Interface, was eine komplett abstrakte Definition eines einzelnen Centroids darstellt. Das Interface verlangt die Implementierung von zwei Methoden:

- `calc_distance(dp: Datapoint) -> float` berechnet den Abstand zwischen dem Centroid und einem Datenpunkt. Auch dieser Datenpunkt ist lediglich als `TypeVariable` definiert. Es obliegt also der Centroid-Implementierung, welches Format die Datenpunkte haben müssen.
- `on_add_point(dp: Datapoint)` wird aufgerufen, wenn ein neuer Datenpunkt zum Cluster dieses Centroid hinzugefügt wird. Die Methode sollte den internen State des Centroid aktualisieren, sodass entsprechend die `calc_distance`-Methode nach dem Hinzufügen eines Datenpunktes entsprechend andere Ergebnisse liefert, da sich der Centroid verschoben hat.

Die tatsächliche Implementierung dieses Interfaces liegt auf der Seite des Anwenders. So könnte eine Variante für ausschließlich numerische Attribute implementiert werden, welche den euklidischen Abstand für die Distanzberechnung benutzt. Eine andere Implementierung könnte sowohl numerische als auch kategorische Attribute verarbeiten, unterstützt aber keine `null`-Values usw.

## Generisches K-Means

Die umgesetzte Version des K-Means nutzt also das **Centroid**-Interface für das Clustering. Dadurch ist es streng genommen kein reiner “K-Means” mehr, sondern abhängig von der Centroid-Klasse eventuell ein K-Modes, ein K-Prototypes oder etwas komplett anderes. Aus Gründen Einfachheit wird stets vom (generischen) K-Means die Rede sein.

Die Umsetzung ähnelt der Version von scikit-learn. **KMeans** ist eine Klasse, welche direkt bei der Instanziierung das Datenset, die implementierte Centroid-Klasse und eventuelle weitere Parameter übergeben bekommt. Mit der Instanziierung wird direkt das Clustering ausgeführt. Die Ergebnisse können anschließend über Attribute der Instanz abgerufen werden.

Es können sehr ähnliche Parameter wie in der scikit-learn-Implementierung für das Clustering gesetzt werden. So kann mit dem Parameter **n\_init** festgelegt werden, wie häufig sich der K-Means selbst initialisiert, um anschließend den besten “Lauf” auszuwählen. Über **random\_state** lässt sich ein Seed für die zufällige Wahl der initialen Startpunkte festlegen usw. [scik22]

Im angehängten Git-Repository liegt im Ordner **cluster-analysis > reports > clustering** eine Datei namens **0-algorithm-check.html**. Sie enthält den Export eines Jupyter Notebooks, in welchem die Implementierung von scikit-learn, Nico de Vos und des Autors dieser Arbeit miteinander verglichen werden. Die Verfahren werden mit ähnlichen Parametern aufgerufen und liefern sehr ähnliche Ergebnisse über das gleiche Datenset.

## Generisches Bisecting K-Means

Mithilfe des generischen K-Means wurde schließlich die generische Bisecting K-Means-Version implementiert. Auch der **BisectingKMeans** ist eine Klasse, welche direkt mit der Initialisierung das hierarchische Clustering mithilfe des K-Means ausführt. Der Abruf der Ergebnisse erfolgt ebenfalls über Attribute der Klasse. Das folgende Listing zeigt eine mögliche Darstellungsform des Clustering-Ergebnisses:

```

1  # ...
2  BisectingKMeans(dataset, Centroid).labels
3  # Ausgabe:
4  [
5      {0, 1, 2}, # Datenpunkt 1
6      {0, 1},   # Datenpunkt 2
7      {0},      # Datenpunkt 3
8      {0, 3, 4}, # Datenpunkt 4
9      {0, 3},   # Datenpunkt 5
10 ]

```

In dem Beispiel wurde ein Clustering über ein Datenset mit fünf Punkten durchgeführt. Jede Zeile listet die Clusterzuordnungen für jeweils einen Datenpunkt. Datenpunkt 1 gehört bspw. den Clustern 0, 1 und 2 an. Da es sich um ein Top-down-Clustering handelt, starten alle Datenpunkte entsprechend initial im Cluster 0. Der erste Split trennte die ersten beiden Punkte vom Rest. Als nächstes wurden Punkt 1 und 2 ebenfalls voneinander getrennt usw.

Es gibt in der Klasse auch eine Methode namens **labels\_flat(k: int)**. Hiermit können die Clusterzuordnungen für ein spezifisches  $k$  abgerufen werden. Entsprechend wäre das Ergebnis für das gegebene Beispiel mit  $k = 3$ :

```

1 # ...
2 BisectingKMeans(dataset, Centroid).labels_flat(2)
3 # Ausgabe:
4 [ 1, 1, 0, 0, 0 ]
5 # ...
6 BisectingKMeans(dataset, Centroid).labels_flat(4)
7 # Ausgabe:
8 [ 2, 1, 0, 3, 3 ]

```

Aus einer `BisectingKMeans`-Instanz kann also die Cluster-Zuordnung für jede beliebige Hierarchie-Ebene abgerufen werden.

### 4.3.3 Weitere Implementierungen

#### Centroid-Klasse

Mit der Implementierung des `Centroid`-Interfaces konnte nun das hergeleitete Konzept aus Kapitel 3 umgesetzt werden. Die Klasse verarbeitet Datenpunkte in Form einer Hash-Map, welche die “codes” der Attribute aus Akeneo einem numerischen, kategorischen oder multi-kategorischen Wert zuordnet. Das folgende Listing zeigt die Typ-Definition eines solchen Datenpunktes in Python.

```

1 Datapoint = dict[str, float|str|set[str]]

```

Damit weisen die Datenpunkte eine sehr ähnliche Struktur zu den “ProductValues” in Akeneo auf und bedürfen nur noch geringfügiger Vorverarbeitung.

Die `calc_distance`-Funktion konnte fast eins-zu-eins zu der serialisierten Formel in Kapitel 3 implementiert werden. `on_add_point` aktualisiert den Centroid in den numerischen Werten über den Durchschnitt und in den kategorischen und multi-kategorischen Werten über den Modus. `null`-Values (welche dadurch zustande kommen, dass ein Produkte einige Attribute nicht in seiner Hash-Map aufweist) werden wie beschrieben behandelt.

#### Datenvorverarbeitung

Im Rahmen der Vorverarbeitung müssen die “Products” aus Akeneo-PIM in die Form des definierten `Datapoint` gebracht werden. Dies geschieht mit Hilfe der `parse_products()`-Funktion. Sie extrahiert die “ProductValues” und bereitet sie entsprechend auf. Je nach Attribut-Typ werden hier verschiedene Schritte durchgeführt:

- Numerische Attribute werden entsprechend der Tabelle in Kapitel 3.3.2 verarbeitet und normalisiert.
- Kategorische Attribute bleiben wie sie sind, denn die serialisierte Version der Distanzfunktion bedarf keiner vorherigen Umwandlung in binäre Attribute.
- Multi-kategorische Attribute sind ebenfalls bereits in der richtigen Form
- Textzeilen werden entsprechend mithilfe der Python-Bibliothek `nltk` (<https://www.nltk.org/>), welche auf das Natural Language Processing spezialisiert ist, tokenisiert.
- Alle anderen Arten von Attributen werden entfernt.



In dem `akeneo_clustering`-Package existieren noch weitere Hilfsfunktionen, welche hier aber nicht weiter von Belang sind.

Damit sind alle Vorbereitungen für die Evaluation getroffen.

## 4.4 Evaluation

Die Evaluation erfolgt, wie in der Konzeption festgelegt, zuerst nur mit den Hüllen, danach nur mit den Smartphones und schließlich mit allen Produkten zusammen.

Die Versuche laufen stets nach einem ähnlichen Muster ab: Zuerst werden die jeweiligen Produkte aus Akeneo geladen und vorverarbeitet (wie beschrieben mittels der `parse_products()`-Funktion und weiteren). Dann findet eine kurze Analyse der tatsächlich vorkommenden Attribute statt, welche davon viele `null`-Values enthalten etc. Anschließend werden immer verschiedene Kombinationen an Attributen ausgewählt und das Clustering wird mit dieser Auswahl durchgeführt. Zu den Clustering-Ergebnisse werden die Metriken für die Stabilität, Qualität und Erkennungsfähigkeit berechnet und ausgegeben. Daran können sich entsprechend weiterführende Analysen anschließen.

Die genaue Berechnung der Metriken funktioniert dabei, wie folgt:

- Die *Stabilität* wird berechnet, indem das Clustering mit den gewählten Attributen zehn Mal durchgeführt wird, jedes mal mit einem anderen Seed für die Zufallsinitialisierung. Dann werden die Clusterzuordnungen des ersten Durchlaufes nacheinander mit den neun folgenden Durchläufen verglichen. Der Vergleich erfolgt so, dass mittels der `labels_flat`-Methode des `BisectingKMeans` nacheinander alle Hierarchie-Ebenen von 2 bis  $n - 1$  abgerufen werden. Für die Clusterzuordnung von zwei verschiedenen Initialisierungen wird nun der Adjusted-Rand-Index (Implementierung aus `scikit-learn`) berechnet, welche die Übereinstimmung beider Clustering-Ergebnisse misst. Man erhält also  $9 \cdot (n - 2)$  verschiedene Ergebnisse. Aus all diesen Werten wird der Durchschnitt berechnet. Die Stabilität ist also der durchschnittliche Adjusted-Rand-Index (Ähnlichkeit) über alle sinnvollen Hierarchie-Ebenen von einem Clustering zu neun weiteren Durchläufen mit exakt den gleichen Parametern.
- Die *Qualität* wird über den Silhouetten-Koeffizienten ermittelt. Die Implementierung in `scikit-learn` erlaubt die Verwendung dieses Koeffizienten mit eigenen Distanzfunktionen, weswegen diese Metrik dem Davies-Bouldin-Index vorgezogen worden ist. Ähnlich wie bei der Stabilität wird ebenfalls die `labels_flat`-Methode benutzt, um alle Clusterzuordnungen über die verschiedenen sinnvollen Hierarchie-Stufen ( $2 \leq k \leq n - 1$ ) zu erhalten. Für jede Stufe wird nun der Silhouetten-Koeffizient berechnet. Anschließend wird der Durchschnitt aller Koeffizienten über alle Ebenen gebildet. D.h. die Qualität ist der durchschnittliche Silhouetten-Koeffizient eines Clustering-Durchlaufes über alle sinnvollen Hierarchie-Ebenen.
- Die *Erkennungsfähigkeit* wird über den Vergleich der Ähnlichkeit mit den “Akeneo-Categories” durchgeführt, in denen die Smartphone-Generationen und -Modelle hinterlegt sind. Über die `labels_flat`-Methode wird die Zuordnung für die jeweilige Stufe abgefragt (Generationen:  $k = 3$ , Modelle:  $k = 11$ ). Anschließend wird der Adjusted-Rand-Index zwischen den berechneten und den erwarteten Zuteilungen ermittelt. Hier

werden für jeden Versuch also in der Regel zwei Werte für die jeweiligen  $k$ s gegeben sein.

- Speziell in den Smartphones kommen zusätzlich noch die Duplikate vor, welche eine Sonderform für die Erkennungsfähigkeit darstellen. Hier ist die Erwartung, dass die Produkte, welche Duplikate von einander sind, über alle Hierarchie-Ebenen (minus der letzten) stets in die gleichen Cluster zugeteilt sein müssten. Wie bereits erklärt, kann aus der `BisectingKMeans`-Klasse zu jedem Datenpunkt die Zugehörigkeit zu allen Clustern im Verlaufe des Prozesses abgerufen werden. Die Menge  $y_1$  sind also alle Cluster, denen der Punkt  $x_1$  angehört und  $y_2$  entsprechend alle Cluster, denen  $x_2$  angehört. Mit Hilfe eines abgewandelten Jaccard-Koeffizienten kann nun berechnet werden, ob beide Punkte häufig denselben Clustern zugeordnet worden sind:

$$\frac{|y_1 \cap y_2| - 1}{|y_1 \cup y_2| - 1} \quad (4.1)$$

Da die Duplikate im letzten Split ebenfalls in verschiedenen Clustern landen, wird im Zähler und im Nenner entsprechend die 1 für diesen finalen Split abgezogen. Sind beide Datenpunkte, wie erwartet, stets in den gleichen Clustern gewesen, so liegt der Wert des Koeffizienten bei 1. Wurden sie früher getrennt (also andere Produkte wurden als ähnlicher klassifiziert als die Duplikate), liegt der Wert entsprechend niedriger.

Für alle vorkommenden Duplikate wird dieser modifizierte Jaccard-Koeffizient berechnet und anschließend der Durchschnitt aus diesen Koeffizienten gebildet. Der Spezialwert "Duplikate" in der Erkennungsfähigkeit ist also die durchschnittliche Übereinstimmung der Clusterzuteilung aller Duplikate.

Alle Metriken liegen damit im Bereich  $[-1; 1]$  (außer die Duplikat-Erkennung:  $[0; 1]$ ) und Werte nahe der 1 stellen das beste Ergebnis dar. Werte um die 0 oder sogar tiefer sind entsprechend negativ für den jeweiligen Versuch zu werten.

Außerdem ist wichtig zu erwähnen, dass die Werte der Stabilität nahe der 1 liegen sollten. Andernfalls ist das Clustering nicht deterministisch und die Distanzfunktion trennt die Produkte nicht ausreichend voneinander. Die Qualität sollte auf jeden Fall positiv sein, allerdings ist es ganz normal, dass die Qualität auf bestimmten Hierarchie-Ebenen höher ist und auf anderen niedriger, wodurch im Durchschnitt eher mittelmäßige Werte in dieser Metrik entstehen. Die Erkennungsfähigkeit sollte so hoch wie möglich liegen, da dies ja der intuitiven Einteilung der Produkte durch Menschen entspricht. Liegen die Werte hier unter 0.5 ist die Verwendung in der Praxis wohl eher ausgeschlossen.

## 5 Auswertung

TODO: Kommentare: Warum Stabilität hoch und Duplikate hoch, aber Qualität niedrig? Warum klappt Trennung der Cluster nicht so gut. => Strings => zu nah Abbildungen von Produkten und Clustern??? vielleicht zur Untermuerung der beschriebenen Aspekte Oder Referenz auf Datenset? => Export von Produktset in Final?

### 5.1 Datenset “Smartphone-Hüllen”

#### 5.1.1 Überblick

Das hergeleitete Clustering-Verfahren wurde zuerst auf die Smartphone-Hüllen des Datensets angewendet. Es enthält 80 verschiedene Produkte von 4 verschiedenen Herstellern. Die nachfolgende Tabelle zeigte einige Informationen zu den Attributen dieser Produktkategorie.

Tabelle 5.1: Übersicht zu den Attributen der Smartphone-Hüllen

Typ	Art	Anzahl	Ø non-null	Ø unique
numerisch	erf.	1	76.0	7.0
	opt.	5	19.4	9.2
kategorisch	erf.	3	78.3	2.7
	opt.	8	28.5	1.4
multi-kat.	erf.	1	57.0	10.0
string	erf.	4	79.2	69.2

Die Smartphone-Hüllen zeichnen sich vor allem durch eine überschaubare Anzahl an 22 verschiedenen Attributen aus. In der Tabelle sind die Attribute nach ihrem Typen und der Erforderlichkeit (erforderlich oder optional) gruppiert dargestellt. Für jede Gruppe ist in der dritten Spalte die Anzahl an Attributen der entsprechenden Gruppe aufgeführt. Attribute, in denen keine einzige Wertaussprägung in den Produkten vorkommt, sind bereits entfernt. Ebenso sind nur Attribute betrachtet worden, die mit dem hergeleiteten Verfahren verarbeitet werden können.

Die multi-kategorischen und String-Attribute sind allesamt erforderlich in dieser Produktgruppe. Für numerische und kategorische Werte existieren sowohl erforderliche als auch optionale Attribute.

Die Spalte “Ø non-null” gibt an, wie viele der 80 Produkte im Schnitt in der jeweiligen Attribut-Art einen Wert ausweisen (also nicht null sind). Erforderliche Attribute liegen hier stets bei etwas unter 80 mit Ausnahme des einen multi-kategorischen Attributs. Das heißt,

dass die erforderlichen Attribute tatsächlich meistens mit Werten gefüllt sind – wenn auch nicht immer.

Die Spalte “Ø unique” gibt an, wie viele unterschiedliche Wertausprägungen im Schnitt in der jeweiligen Attribut-Art vorkommen. null-Werte zählen in diese Spalte nicht mit hinein. Besonders die String-Attribute weisen in praktisch jedem Produkt einen anderen Wert auf, was aber auch in der Natur dieser Attribut-Art liegt. Die multi-kategorischen und numerischen Attribute weisen im Schnitt knapp 10 unterschiedliche Wertausprägungen auf. Das liegt daran, dass das Datenset Hüllen für 11 verschiedene Smartphone-Modelle enthält. Die kategorischen weisen die geringste Vielfalt an unterschiedlichen Werten auf. Das erklärt sich daraus, dass viele dieser Attribute boolesche Werte in Akeneo sind.

### 5.1.2 Verarbeitung multi-kategorischer Attribute

Da in der klassischen Clusteranalyse keine multi-kategorischen Attribute beschrieben sind, ist ein spezielles Verfahren zur Verarbeitung dieser Attribute erarbeitet worden. Diese Verarbeitung wird nun mit einem alternativen Ansatz verglichen. Dazu ist das Clustering nur mit dem einen multi-kategorischen Attribut (Material) im Datenset durchgeführt worden. Das erste Mal wurde die hergeleitete Verarbeitung verwendet. Beim zweiten Durchlauf sind alle multi-kategorischen Werte in kategorische umgewandelt worden (durch einfache Komma-separierte Verkettung). Die folgende Tabelle zeigt die berechneten Metriken zu beiden Clusterings:

Tabelle 5.2: Clustering der Hüllen mit einem multi-kategorischen Attribut

Verarbeitung	Stabilität	Qualität	Erkennung	
			<i>Generation</i>	<i>Modell</i>
multi-kategorisch	0.71	0.44	0.02	0.04
(single) kategorisch	0.61	0.44	0.00	0.04

Die Ergebnisse beider Clusterings unterscheiden sich kaum voneinander. Lediglich die Stabilität ist mit der hergeleiteten Verarbeitungsart etwas höher. Insgesamt liegt die Stabilität aber recht niedrig, was daran liegen könnte, dass nur ein einziges Attribut für das Clustering verwendet worden ist mit ungefähr 10 verschiedenen Wertausprägungen. Entsprechend sind viele Produkte komplett identisch zueinander, was zu einer schlechteren Stabilität führt. Die Qualität liegt auf einem mittleren Niveau und ist in beiden Versuchen identisch gewesen. Die Erkennung der Smartphone-Generation ( $k = 3$ ) und des -Modells ( $k = 11$ ) liegt faktisch bei 0. Bei dem einen multi-kategorischen Attribut, welches hier verwendet wurde, handelt es sich um das Material. Das ist augenscheinlich kein gutes Attribut, um festzustellen, zu welchem Smartphone die entsprechende Hülle passt.

Als nächstes sind die gleichen Versuche mit den String-Attributen durchgeführt worden. Zuerst wurden die Strings also in Tokens umgewandelt und als multi-kategorische Attribute betrachtet und geclustert. Im zweiten Versuch blieben die Strings unverändert und wurden einfach direkt als kategorische Attribute angesehen.

Tabelle 5.3: Clustering der Hüllen mit String-Attributen

Name	Stabilität	Qualität	Erkennung	
			<i>Generation</i>	<i>Modell</i>
Strings als multi-kat.	0.87	0.20	0.54	0.16
Strings als single-kat.	0.64	0.15	0.03	−0.01

Die Tabelle zeigt die Ergebnisse dieser Versuche. Für die Strings macht die Verarbeitung als “multi-kategorische” Attribute einen enormen Unterschied. Alle Metriken verbessern sich drastisch durch die hergeleitete Art der Verarbeitung. Das Aufteilen der Strings in Tokens und der anschließende Vergleich der Ähnlichkeit der auftretenden Tokens steigert vor allem die Erkennung der Smartphone-Generation. Bei den vier Attributen handelt sich um “Name”, “Titel”, “Short Description”, “Short Summary”. “Name” enthält eher willkürlich vergebene Zahlen- und Buchstabenkombinationen, die keinem erkennbaren Muster folgen. In den drei anderen Attributen steckt aber stets die jeweilige Smartphone-Generation, für welche die Hülle ausgelegt ist (also die Token “s20”, “s21” und “s22”), was die hohe Erkennung erklärt.

Vor allem der zweite Versuch mit den String-Attributen legt nahe, dass das hergeleitete Verfahren für die Verarbeitung multi-kategorischer Attribute, sinnvolle Ergebnisse für die Clusteranalyse bringen und einen alternativen Ansatz für die Verarbeitung von String-Werten darstellen kann.

### 5.1.3 Attribut-Auswahl

Als nächstes geht es darum, dass hergeleitete Clustering-Verfahren als ganzes zu bewerten. Dabei geht es auch um die Auswahl an Attributen. Eventuell funktioniert das Verfahren besser, wenn nur Attribute eines bestimmten Types verwendet werden etc. In allen Versuchen mit den multi-kategorischen und String-Attributen ist von hier an die hergeleitete Verarbeitung verwendet worden.

#### Vergleich nach Datentypen

Zuerst ist geprüft worden, ob bestimmte Typen von Attributen und Typen-Kombinationen besser für das Clustern des Datensets geeignet sind als andere. Insgesamt gibt es ja vier verschiedene Typen (numerisch, kategorisch, multi-kategorisch und Strings). Das Clustering wurde nun in allen möglichen Kombinationen an Attribut-Typen durchgeführt. Also zuerst wurden nur die numerischen Attribute für das Clustering verwendet, dann nur die kategorischen usw. Im letzten Durchlauf wurden schließlich alle Attribut-Typen benutzt.

Zuerst werden die Ergebnisse des Clusterings mit jeweils einem Attribut-Typ betrachtet. Die folgende Tabelle zeigt diese Ergebnisse:

Tabelle 5.4: Clustering der Hüllen mit jeweils einem Attribut-Typ

Typen	Stabilität	Qualität	Erkennung	
			<i>Generation</i>	<i>Modell</i>
numerisch	0.85	0.43	0.15	0.45
kategorisch	0.44	0.39	0.08	0.12
multi-kat.	0.71	0.44	0.02	0.04
string	0.87	0.20	0.54	0.16

Die ausschließliche Verwendung numerischer Attribute liefert adäquate Werte für Stabilität und Qualität. In der Erkennung der passenden Smartphone-Generation erreicht diese Attribut-Gruppe im Vergleich sogar die besten Ergebnisse, wenn auch ein Wert von 0.45 keine sonderlich gute Übereinstimmung anzeigt.

Die kategorischen Attribute enthalten viele **null**-Values und insgesamt sehr wenig verschiedene Wertausprägungen, was die schlechten Werte auf allen Metriken erklärt. In Kombination mit anderen Attributen könnte diese Gruppe das Clustering positiv beeinflussen. Für sich alleine genommen, eignen sie sich aber nicht für eine effektive Clusteranalyse.

Zu dem einen multi-kategorischen Attribut (Material) wurde im vorherigen Abschnitt ausführlich analysiert, warum die Erkennungsfähigkeit hier nahe 0 liegt. Die Stabilität ist eher mittelmäßig, die Qualität liegt aber von allen Typen hier am höchsten.

Die Strings liefern die interessantesten Ergebnisse, da sie sehr ambivalent sind. Für die Stabilität wurde hier der höchste und für die Qualität der niedrigste Wert erreicht. Die Erkennung der zur Hülle gehörenden Smartphone-Generation liefert eine im Vergleich recht hohe Übereinstimmung (was ebenfalls im vorherigen Abschnitt bereits diskutiert worden ist), die Erkennung des passenden Smartphone-Modells ist wiederum sehr schlecht.

Für sich alleine genommen scheint keine Attribut-Art sinnvolle Cluster zu produzieren. Daher werden als nächstes die Clusterings mit den verschiedenen Kombinationen von Attribut-Typen betrachtet. Da es hier sehr viele mögliche Paarungen gibt, zeigt die folgende Tabelle nur eine Auswahl der Versuche. I.d.R. sind die Versuche ausgewählt worden, welche in mindestens einer der Metriken den höchsten Wert errungen hat.

Tabelle 5.5: Clustering der Hüllen mit verschiedenen Kombinationen an Attribut-Typen

Typen	Stabilität	Qualität	Erkennung	
			<i>Generation</i>	<i>Modell</i>
num+kat	0.88	<b>0.52</b>	0.09	0.26
num+str	0.86	0.20	0.14	<b>0.46</b>
num+kat+mul	0.93	0.46	<b>0.18</b>	0.22
kat+mul+str	<b>0.94</b>	0.29	0.09	0.10
alle	0.92	0.29	0.12	0.25

Interessant ist, dass es keine “überlegene Auswahl” an Attributen gibt, sondern je nach Metrik eine andere Kombination am besten abschneidet.

Für die Stabilität lässt sich feststellen, dass sich die Verwendung von möglichst vielen Attribut-Typen positiv auf diese Metrik auswirkt. Für die Qualität gilt dies allerdings nicht. Hier scheinen sich die Werte zu verschlechtern, sobald die String-Attribute Teil der Auswahl sind. Werden sie weggelassen, liegt die Qualität im Schnitt doppelt so hoch.

Die Übereinstimmung mit den zu den Hüllen gehörenden Smartphone-Generationen und Modelle ist in allen Versuchen sehr schlecht. In den Clusterings mit jedem Attribut-Typ allein (siehe vorherige Tabelle) konnten die numerischen am besten die Modelle erkennen und die Strings die Generationen. Die Kombination beider Attribut-Arten liefert immer noch eine recht gute Erkennung der Modelle, aber die Generationen werden nun nicht mehr richtig zugeordnet. Generell kann keine Kombination an Attributen die Generationen so zuverlässig erkennen, wie die String-Attribute für sich alleine genommen.

Die schlechte Erkennung führte zu der Erkenntnis, dass aus den Attributen der Smartphone-Hüllen wohl eher schwierig abzuleiten ist, zu welchen Smartphones sie passen. Eine Analyse der vorkommenden Attribute bestätigt diese Annahme: Unter den Attributen gibt es lediglich "Brand compatibility" (wobei hier nur "Samsung" als einziger Wert auftritt), "Maximum Screen Size" und eventuell "Height", "Width", "Depth", welche Rückschlüsse zu den passenden Smartphones bieten. Andere Attribute wie das beschriebene "Material" oder "Number of Card Pockets" bilden hingegen ganz andere Eigenschaften ab.

Daher wird die Erkennungsfähigkeit erst einmal nicht weiter betrachtet und stärkerer Fokus auf die Stabilität und Qualität gelegt.

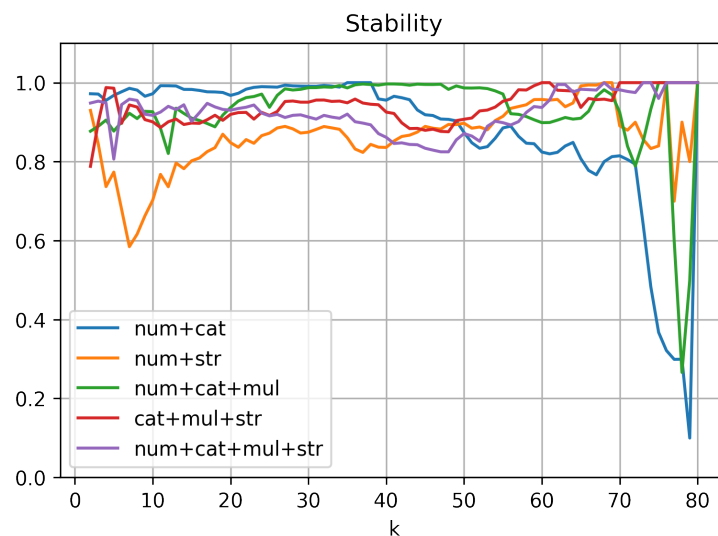


Abbildung 5.1: Stabilität der Clusterings nach Typen über alle Hierarchie-Ebenen

Abbildung 5.1 zeigt die Stabilität der verschiedenen Typ-Kombinationen über die verschiedenen Hierarchie-Ebenen ( $k$ ) des Clusterings. Die Kombination aus numerischen und kategorischen Attributen erreicht auf den ersten Ebenen bis  $k = 38$  die höchste Stabilität, verschlechtert sich in den nachfolgenden Stufen aber drastisch. Die Kombinationen, welche auch String-Attribute enthalten, verhalten sich eher gegenteilig. Die Stabilität ist auf den niedrigeren Ebenen schlechter und gegen Ende des Top-down-Clusterings deutlich stabiler. Dieses Phänomen lässt sich mit der Menge an unterschiedlichen Wertausprägungen

der Attribut-Typen erklären. Faktisch jeder String ist anders, dadurch sind die Clusterzuordnungen gegen Ende besonders deterministisch, da sich die Strings immernoch in Nuancen voneinander unterscheiden (dank der Verarbeitung als multi-kategorische Attribute). Die Produkte sind sich aber in den numerischen und kategorischen Attribute ab einer bestimmten Feinheit des Clusterings faktisch deckungsgleich (aufgrund der geringen Vielfalt an unterschiedlichen Wertausprägungen).

In der Praxis sind die oberen Ebenen der Hierarchie interessanter als die vielen kleinen Cluster gegen Ende. Daher ist die Kombination aus numerischen und kategorischen Attributen in dieser Betrachtung als die beste anzusehen.

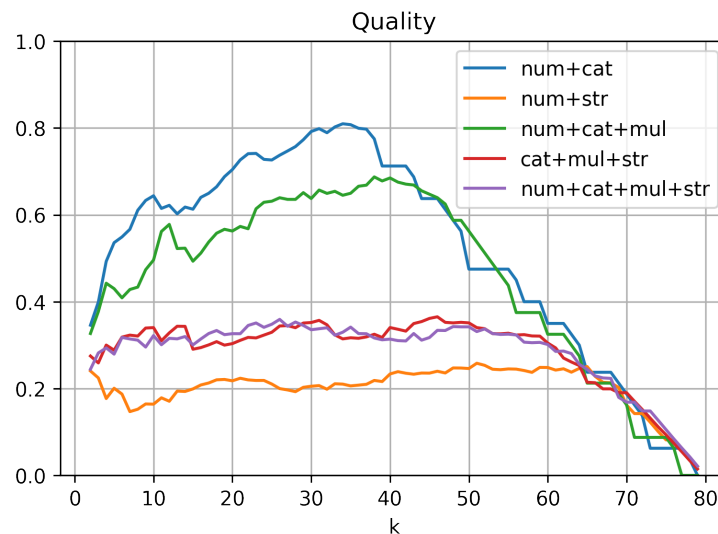


Abbildung 5.2: Qualität der Clusterings nach Typen über alle Hierarchie-Ebenen

Abbildung 5.2 zeigt die Qualität (also den Silhouetten-Koeffizienten) der Clusterings für die verschiedenen Ebenen ( $k$ ). Je näher die Anzahl an Clustern an die Anzahl aller Produkte kommt, desto geringer sinkt dieser Koeffizient für alle Versuche. Das liegt daran, dass viele Punkte sehr nahe zueinander liegen, aber dennoch in unterschiedliche Cluster sortiert werden müssen (aufgrund des hierarchischen Verfahrens). Die CLuster sind somit immer schlechter voneinander getrennt (da sie faktisch “aufeinander” liegen) und die Qualität sinkt auf 0.

Es ist eindeutig zu sehen, dass String-Attribute die Qualität sehr negativ beeinflussen. Alle Kombinationen, in denen auch die Strings verarbeitet worden sind, liefern durch die Ebenen hinweg schlechte Werte. Die Kombinationen ohne Strings sind bis zu  $k = 65$  stets deutlich besser bewertet. Wie bereits erwähnt, sind die hohen Hierarchie-Ebenen weniger interessant in der Praxis. Dadurch ist Verwendung der Strings im Clustering für dieses Datenset nicht zu empfehlen.

### Zusätzliche Erkenntnisse aus den Versuchen

Am Ende des vorherigen Abschnittes ist die Qualität des Clusterings mithilfe des Silhouetten-Koeffizienten analysiert worden. Dieser Koeffizient kann genutzt werden, um die “optimale” Anzahl an Clustern zu finden. Dazu wird analysiert, für welche Anzahl



an Clustern, der Koeffizient seine maximalen Werte annimmt. An diesem Punkt in der Hierarchie ist folglich die Trennung der Cluster am schärfsten.

In Abbildung 5.2 ist zu erkennen, dass die Kombination aus numerischen und kategorischen Attributen ihre höchsten Werte in der Qualität zwischen  $k = 20$  und  $k = 40$  erreicht. Dadurch kam eine Vermutung auf: Vielleicht liegen die Ergebnisse für die Erkennung der Smartphone-Generation und -Modelle deshalb so niedrig, weil sich die Hüllen verschiedener Hersteller (für das gleiche Gerät) zu stark unterscheiden. U.U. ist es sinnvoller die Hüllen zuerst nach Hersteller zu gruppieren und anschließend das Clustering auf die Generationen und Modelle zu prüfen.

Die Clusterings wurden deshalb erneut auf die Erkennungsfähigkeit überprüft. Dazu wurden die Produkte auf verschiedene Arten gruppiert. Zuerst erfolgte die Gruppierung nach Hersteller ( $k = 4$ ), danach nach Hersteller und Smartphone-Generation ( $k = 8$ ) zusammen und schließlich nach Hersteller und Smartphone-Modell ( $k = 25$ ) zusammen. Die Übereinstimmung der Clusterings mit diesen Gruppierung wurde anschließend mit dem Adjusted-Rand-Index quantifiziert. Die folgenden Tabelle zeigt die Ergebnisse für ausgewählte Typen-Kombinationen:

Tabelle 5.6: Erkennung der gewünschten Cluster auf Basis der Hersteller

Typen	Hersteller	Generation	Modell
	$k = 4$	$k = 8$	$k = 25$
numerisch	0.32	0.17	0.27
kategorisch	0.71	0.61	0.31
multi-kat.	0.26	0.35	0.16
string	0.04	0.43	0.48
num+kat	<b>0.76</b>	<b>0.65</b>	<b>0.61</b>
num+str	0.34	0.44	0.60
num+kat+mul	0.55	0.56	0.55
kat+mul+str	0.73	0.52	0.31
alle	0.69	0.63	0.55

Die Übereinstimmung mit dieser Art der Gruppierung liegt deutlich höher als mit der ursprünglich angenommenen (wo die Hersteller der Hüllen nicht berücksichtigt worden sind). Die Kombination aus numerischen und kategorischen Attributen erreicht für alle Ebenen die höchste Erkennungsfähigkeit.

Damit wird der entstandene Eindruck, dass die numerischen und kategorischen Attributen in Kombination am besten für das Clustering der Produkte geeignet sind, weiter untermauert. Durch das Clustering mit diesen Attributen ist erkannt worden, dass die Hüllen der Hersteller zueinander unterschiedlicher sind als, für welches Smartphone die jeweilige Hülle geeignet ist. Wird diese erste Ebene (Hersteller) berücksichtigt, tritt anschließend die angenommene Struktur wieder zutage. Produkte des selben Herstellers werden tatsächlich nach ihrer passenden Smartphone-Generation und -Modell geclustert. Die Übereinstimmung liegt mit 0.65 bzw. 0.61 zwar nicht überragend hoch, aber es wurde bereits geklärt, dass viele Attribute in den Hüllen generell weniger Rückschluss über die passenden Smartphones liefern.

## Vergleich nach Erforderlichkeit

Nachdem die numerischen und kategorischen Attribute als beste Typen-Kombination identifiziert worden sind, stellt sich die Frage, ob sich die Metriken weiter verbessern lassen. Ein Ansatz dabei ist, die Informationen zu nutzen, welche bereits in Akeneo hinterlegt sind. In den “Families” können Attribute als erforderlich oder optional gekennzeichnet werden, was einen enormen Einfluss auf die Menge an auftretenden `null`-Values hat. Im folgenden wird analysiert, ob die Unterscheidung zwischen erforderlichen und optionalen Attributen Einfluss auf das Clustering hat.

Dazu sind zwei weitere Clusterings mit den numerischen und kategorischen Attributen durchgeführt worden. Einmal wurden nur erforderliche und einmal nur optionale Attribute verwendet. Die Ergebnisse werden nun mit dem Clustering mittels beider Arten verglichen.

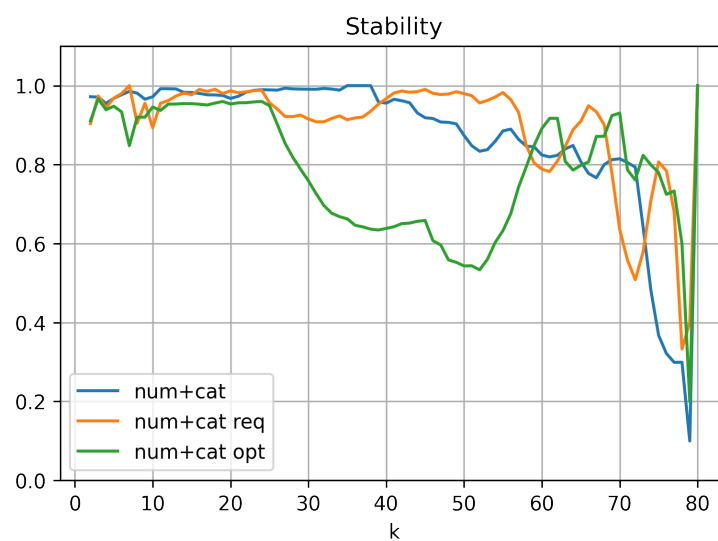


Abbildung 5.3: Stabilität der Clusterings nach Erforderlichkeit über alle Hierarchie-Ebenen

Abbildung 5.3 zeigt die Stabilität für verschiedene Werte für  $k$ . Sobald entweder nur erforderliche oder nur optionale Attribute genutzt werden, liegt die Stabilität im Schnitt niedriger und schwankt stärker über die verschiedenen Ebenen. In Bezug auf die Stabilität ist die reduzierte Auswahl von Attributen nach ihrer Erforderlichkeit also nicht zu empfehlen.

Abbildung 5.4 zeigt die Qualität für die verschiedenen Hierarchie-Ebenen. Wenig überraschend liefern nur optionale Attribute insgesamt eine schlechtere Qualität, da es hier weniger feine Unterschiede zwischen den Produkten gibt. Im Bereich  $k = 8$  bis  $k = 25$  produzieren die erforderlichen Attribute bessere Cluster als die Verwendung aller Attribute. Nach  $k = 25$  sind sie aber stets schlechter bewertet. Hieraus kann keine eindeutige Empfehlung gegeben werden.

Zuletzt sei auch die modifizierte Erkennungsfähigkeit nach Hersteller betrachtet. Die folgenden Tabelle zeigt die Übereinstimmung mit der gewünschten Clustereinteilung:

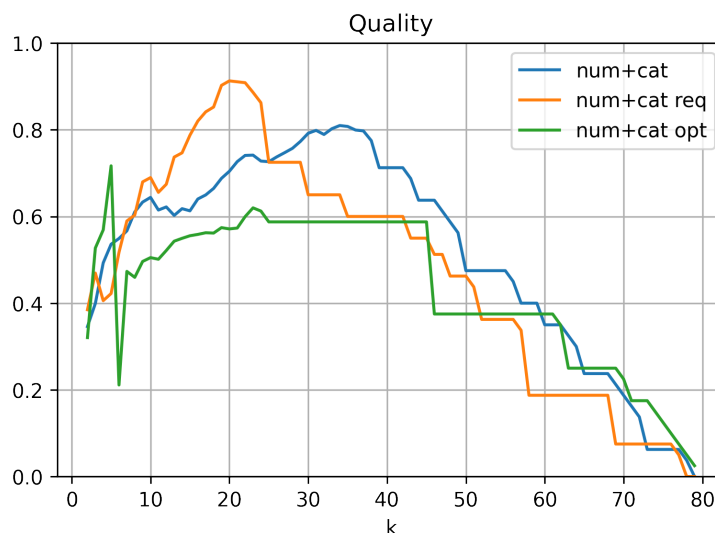


Abbildung 5.4: Qualität der Clusterings nach Erforderlichkeit über alle Hierarchie-Ebenen

Tabelle 5.7: Erkennung der gewünschten Cluster auf Basis der Hersteller nach Erforderlichkeit

Auswahl	Hersteller	Generation	Modell
	$k = 4$	$k = 8$	$k = 25$
alle	0.76	0.65	0.61
nur erf.	0.51	0.27	0.59
nur opt.	0.72	0.61	0.27

Auch in diesem Vergleich ergibt sich kein Vorteil, durch die Beschränkung auf ausschließlich erforderliche oder optionale Attribute.

### Vergleich nach menschlicher Auswahl

Bisher ist das Clustering relativ “pauschal” durchgeführt worden. Also es wurden einfach alle Attribute eines bestimmten Typs bzw. einer bestimmten Typen-Kombination etc. für das Clustering verwendet. In der Praxis werden meistens bestimmte Ziele mit der Clusteranalyse verfolgt. Bspw. wird mit den Metriken zur Erkennungsfähigkeit geprüft, ob Hüllen, welche zu den gleichen Smartphones passen, auch in gleichen Clustern landen. Wie bereits erwähnt, enthalten die Hüllen aber viele Attribute, welche für diese Erkennung inhaltlich keinen Mehrwert liefern (wie das z.B. Material). Daher soll nun geprüft werden, ob eine “schlaue” Auswahl der Attribute, eher die erwarteten Cluster produziert.

Um den Rahmen dieser Arbeit nicht zu sprengen, ist die Auswahl aus der Einschätzung des Autors erfolgt. Die folgende Tabelle zeigt die gewählten Attribute:

Tabelle 5.8: Ausgewählte Attribute für das Clustering der Hüllen

Name	Typ	erforderlich	non-null	unique
Maximum screen size	numerisch	ja	76	7
Width	numerisch	nein	24	12
Height	numerisch	nein	24	11
Depth	numerisch	nein	24	11
Brand compatibility	kategorisch	ja	79	1
Case type	kategorisch	ja	76	3
Title	string	ja	80	80

Die numerischen Attribute bilden die Abmessungen der Hüllen ab, was ein entscheidender Faktor ist, ob die Hülle zum jeweiligen Smartphone passt. Die “Brand compatibility” ist zwar inhaltlich sinnvoll, da das Datenset aber nur Hüllen für Smartphones von Samsung enthält, ist der Mehrwert dieses Attributs begrenzt. “Title” und “Case type” wurden als sinnvolle Ergänzungen zu den numerischen Attributen ausgewählt.

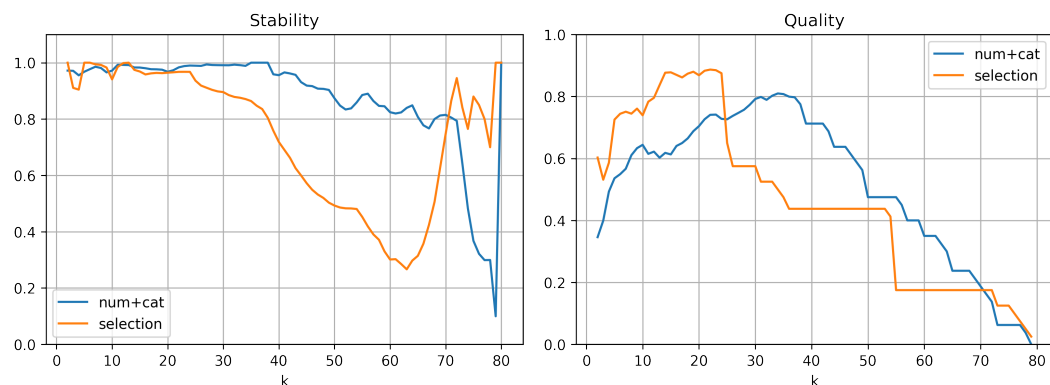


Abbildung 5.5: Stabilität und Qualität der ausgewählten relevanten Attribute im Vergleich zum bisher besten Verfahren

Abbildung 5.5 zeigt die Stabilität und Qualität des Clusterings mit den ausgewählten Attributen im Vergleich zu der Kombination aus allen numerischen und kategorischen Attributen. Die Stabilität ist bis  $k = 24$  bei beiden etwa gleich hoch, danach wird die händische Auswahl deutlich instabiler. Die Qualität der menschlichen Auswahl liegt bis  $k = 24$  deutlich über dem bisher besten Clustering-Ansatz. Danach ist die Qualität ebenfalls durchweg schlechter.

Da in der Praxis vor allem die Ergebnisse für die niedrigen Werte von  $k$  entscheidend sind, könnte die Vorauswahl von Attributen tatsächlich bessere Cluster im relevanten Bereich erzeugen. Für eine finale Entscheidung wird nun die modifizierte Erkennungsfähigkeit nach Herstellern betrachtet.

Tabelle 5.9: Erkennung der gewünschten Cluster auf Basis der Hersteller für die menschliche Auswahl von Attributen

Attribute	Hersteller	Generation	Modell
	$k = 4$	$k = 8$	$k = 25$
num+kat	0.76	0.65	0.61

Attribute	Hersteller	Generation	Modell
Auswahl	0.17	0.12	0.27

Die Tabelle zeigt eindeutig, dass die erwartete Erkennung der zu den Hüllen passenden Smartphones durch die menschliche Auswahl an Attributen nicht verbessert wird. Alle Werte sind deutlich schlechter, als wenn pauschal alle numerischen und kategorischen Attribute verwendet werden. Es sind anschließend noch weitere Versuche durchgeführt worden, wo bspw. nur die ausgewählten numerischen Attribute für das Clustering verwendet worden etc. Aber keine Form der händischen Auswahl an Attributen hat bessere Ergebnisse geliefert als der Pauschalansatz.

#### 5.1.4 Attribut-Gewichtung

Als finaler Ansatz ist mit verschiedenen Gewichtungen der Attribute gearbeitet worden. Dazu sind die Attribute, welche ein höheres Gewicht erhalten sollten, im Datenset entsprechend dupliziert (also mehrfach) eingefügt worden. Anschließend wurde wieder wie gewohnt das Clustering durchgeführt und die entsprechenden Metriken erhoben.

Tabelle 5.10: Clustering der Hüllen mit verschiedenen Gewichtungen der Attribute

Attribute	Gewichtung	Stabilität	Qualität	Erkennung		
				<i>Hersteller</i>	<i>+Generation</i>	<i>+Modell</i>
num+kat	gleichgew.	0.88	0.52	0.76	0.65	0.61
num+kat	mensch.Ausw. x2	0.85	0.50	0.43	0.43	0.63
num+kat	mensch.Ausw. x3	0.83	0.49	0.43	0.43	0.67
alle	mensch.Ausw. x2	0.90	0.26	0.43	0.49	0.57
alle	mensch.Ausw. x3	0.89	0.26	0.43	0.33	0.55

Die Tabelle zeigt die Ergebnisse der Versuche mit verschiedenen Gewichtungen. Die erste Zeile zeigt die Ergebnisse für das bekannte Clustering mit numerischen und kategorischen Attributen ohne irgendeine Übergewichtung. Das ist die Referenz, die es zu überbieten gilt.

In Zeile zwei und drei sind nur die numerischen und kategorischen Attribute für das Clustering verwendet worden, mit zusätzlicher Doppelt- bzw. Dreifachgewichtung der Attribute aus der menschlichen Auswahl. Allerdings sind alle Metriken schlechter als bei der Gleichgewichtung mit Ausnahme der Erkennung der Smartphone-Modelle, welche geringfügig besser geworden ist.

In den letzten beiden Zeilen sind für das Clustering alle Attribute verwendet worden. Zusätzlich sind die Attribute aus dem Abschnitt menschliche Auswahl doppelt bzw. dreifach gewichtet worden. Dieses Vorgehen brachte eine geringfügig bessere Stabilität, alle anderen Metriken haben sich dadurch allerdings verschlechtert.

Insgesamt lässt sich durch die Übergewichtung von Attributen kein Vorteil für das Clustering erkennen.

## 5.2 Datenset “Smartphones”

### 5.2.1 Überblick

Die Smartphone-Hüllen weisen eine überschaubare Menge an Attributen auf. Nun soll das Clustering-Verfahren auf deutlich komplexere Produkte angewendet werden. Dazu sind 42 Smartphones der Firma Samsung importiert worden. Die folgende Tabelle gibt eine Zusammenfassung über die Attribute dieses Datensets.

Tabelle 5.11: Übersicht zu den Attributen der Smartphones

Typ	Art	Anzahl	Ø non-null	Ø unique
numerisch	erf.	8	41.1	5.4
	opt.	48	18.5	3.5
kategorisch	erf.	19	37.9	1.6
	opt.	87	26.1	1.2
multi-kat.	erf.	3	38.7	7.0
	opt.	19	23.1	2.9
string	erf.	5	40.8	24.0
	opt.	6	18.0	4.8

Die Attribute sind wieder nach Typ und Erforderlichkeit gruppiert worden. Die Spalte “Anzahl” zeigt, wie viele Attribute für die jeweilige Gruppe auftreten. “Ø non-null” zeigt die durchschnittliche Menge an gefüllten Werten je Gruppe. Die letzte Spalte “Ø unique” zeigt die durchschnittliche Anzahl an auftretenden verschiedenen Wertaussprägungen in den Produkten der jeweiligen Attribut-Gruppe.

Die erforderlichen Attribute weisen in jeder Gruppe eine sehr geringe Menge an **null**-Werten auf. Bei den optionalen Attributen scheint im Schnitt wenigstens die Hälfte der Produkte mit Werten gefüllt zu sein. Damit ist die Datenqualität bei diesem Datenset auf den ersten Blick höher als bei den Hüllen.

Die erforderlichen Attribute weisen alle im Schnitt mehr unterschiedliche Wertaussprägungen auf als ihre optionalen Counterparts. Wenig überraschend ist bei den Strings erneut die Vielfalt an unterschiedlichen Werten am größten.

### 5.2.2 Verarbeitung multi-kategorischer Attribute

Auch für dieses Datenset sind zuerst nur die multi-kategorischen Attribute ausgewählt und für das Clustering verwendet worden. Beim ersten Versuch sind sie nach dem hergeleiteten Verfahren für multi-kategorischen Attribute verarbeitet worden. Beim zweiten wurden sie in einfache kategorische Attribute umgewandelt. Die folgende Tabelle zeigt die Ergebnisse.

Tabelle 5.12: Clustering der Smartphones mit den multi-kategorischen Attributen

Verarbeitung	Stabilität	Qualität	Erkennung		
			<i>Generation</i>	<i>Modell</i>	<i>Duplikate</i>
multi-kategorisch	0.91	0.39	0.40	0.45	0.89
(single) kategorisch	0.85	0.38	0.12	0.30	0.88

Es sind wieder die bekannten Metriken zu den Clusterings berechnet worden. Unter den Smartphones befinden sich nun auch Duplikate, sodass die Erkennung der Duplikate nun ebenfalls als Metrik auftritt. Sie misst die Übereinstimmung der zugeordneten hierarchischen Cluster zwischen allen Paaren an Duplikaten.

Bei den Smartphone-Hüllen hat die Verarbeitung der multi-kategorischen Attribute keinen wirklichen Unterschied bei diesem Versuch gezeigt. Für die Smartphones zeichnet sich ein anderes Bild. Alle Metriken verbessern sich, wenn das hergeleitete Verfahren angewandt wird, statt der Umwandlung in einfache kategorische Attribute.

Bei den Hüllen gab es nur ein einziges multi-kategorisches Attribut (Material), welches oben- und unten kaum eine Relevanz für die geforderte Erkennung der zugehörigen Smartphones gehabt hat. Die Smartphones selbst weisen 22 verschiedene Attribute von diesem Typ auf. Unter diesen Attributen befinden sich inhaltlich relevante Werte wie z.B. “3G standards” oder “5G bands supported”, welche signifikante Unterschiede zwischen den verschiedenen Smartphone-Generationen abbilden. Die höhere Menge an Attributen und die größere Relevanz erklären, warum die Ergebnisse hier signifikant anders sind als bei den Hüllen.

Analog zu den Versuchen mit den Smartphone-Hüllen, ist das gleiche Vorgehen nun auf die String-Attribute angewandt worden. Zuerst wurden sie nach dem hergeleiteten Verfahren als multi-kategorische Attribute behandelt und geclustert. Anschließend wurde das Clustering wiederholt, dieses mal mit Verarbeitung der Strings als kategorische Attribute.

Tabelle 5.13: Clustering der Smartphones mit String-Attributen

Verarbeitung	Stabilität	Qualität	Erkennung		
			<i>Generation</i>	<i>Modell</i>	<i>Duplikate</i>
Strings als multi-kat.	0.91	0.34	0.64	0.87	1.00
Strings als single-kat.	0.80	0.23	0.14	0.58	1.00

Bei den Hüllen verbesserten sich die Metriken für die Strings deutlich, wenn sie als multi-kategorische Attribute verarbeitet worden sind. Für die Smartphones bestätigt sich dieses Bild erneut. Alle Metriken (mit Ausnahme der Duplikat-Erkennung, die bei allen Versuchen beim Maximal-Wert liegt) verbessern sich immens durch die Tokenisierung und Verarbeitung als multi-kategorische Attribute.

Aus den Versuchen mit den Hüllen und den Smartphones zeichnet sich ab, dass das hergeleitete Verfahren für multi-kategorische Attribute tatsächlich zu besseren Clustern führt. Besonders die String-Attribute profitieren von dieser Art der Verarbeitung enorm.

### 5.2.3 Attribut-Auswahl

#### Vergleich nach Datentypen

Bei den Smartphone-Hüllen ist die Kombination aus numerischen und kategorischen Attributen für das Clustering die beste gewesen. Die Hinzunahme von multi-kategorischen und String-Attributen verschlechterte die Cluster wiederum. Die gleichen Versuche werden nun mit den Smartphones durchgeführt. Es sind alle Kombinationen der vier Attribut-Typen (numerisch, kategorisch, multi-kategorisch und Strings) nacheinander für das Clustering ausgewählt worden. Zuerst werden wieder die Ergebnisse des Clusterings mit jeweils nur einem Typen betrachtet.

Tabelle 5.14: Clustering der Smartphones mit jeweils einem Attribut-Typ

Typen	Stabilität	Qualität	Erkennung		
			<i>Generation</i>	<i>Modell</i>	<i>Duplikate</i>
numerisch	0.88	0.43	0.01	0.75	0.96
kategorisch	0.96	0.45	0.65	0.49	0.81
multi-kat.	0.91	0.39	0.40	0.45	0.89
string	0.91	0.34	0.64	0.87	1.00

Anders als bei den Hüllen bringt für die Smartphones das Clustering mit jeweils den Attributen eines Typs bereits recht hohe Werte in allen Metriken. Das kann an der höheren Menge an Attributen dieser Produktfamilie liegen, welche eine bessere Unterscheidung der Produkte erlaubt.

Die Verwendung der String-Attribute hatte bei den Hüllen mit Ausnahme von der Qualität in allen Metriken im Vergleich sehr gut abgeschnitten. Auch bei den Smartphones zeigt sich dieses Verhalten. Die Strings erreichen in allen Metriken außer den Qualität die besten Werte (knapp zweit-beste bei der Erkennung der Generation). Das könnte daran liegen, dass die Strings aus Attributen wie "Title" oder "Short Description" bestehen. Hier werden i.d.R. die wichtigen Features eines Produktes zusammengefasst. Dabei wird natürlich besonderer Wert auf die für Kunden relevanten Merkmale gelegt. Dies erklärt, warum Strings für sich genommen so gut abschneiden.

Tabelle 5.15: Clustering der Smartphones mit verschiedenen Kombinationen an Attribut-Typen

Typen	Stabilität	Qualität	Erkennung		
			<i>Generation</i>	<i>Modell</i>	<i>Duplikate</i>
num+kat	0.98	<b>0.43</b>	<b>0.65</b>	<b>0.71</b>	0.96
num+mul	0.94	0.39	0.16	0.70	<b>1.00</b>
kat+str	<b>0.99</b>	0.40	<b>0.65</b>	0.42	0.94
num+kat+str	0.98	0.41	<b>0.65</b>	0.66	0.96
num+mul+str	0.92	0.37	0.16	0.70	<b>1.00</b>
alle	0.92	0.39	0.16	0.70	<b>1.00</b>



In der Tabelle sind die Ergebnisse der verschiedenen Kombinationen an Attribut-Typen für das Clustering dargestellt. Wie zuvor sind nur die Kombinationen aufgeführt, welche in mindestens einer der Metriken den Höchstwert erreicht haben (welcher zusätzlich noch fett markiert worden ist).

Anders als bei den Hüllen ist hier die Kombination von numerischen und kategorischen Attributen direkt als überlegend zu erkennen. In allen Metriken wird entweder der Höchstwert oder zumindest der zweithöchste erreicht.

Die Übereinstimmung des Clustering mit den tatsächlichen Smartphone-Generationen und -Modellen liegt in diesen Versuchen viel höher als bei den Hüllen. Das lässt sich dadurch erklären, dass die Smartphones vor allem auch ihre "inneren" Werte in Attributen preisgeben. Es gibt zwar auch Unterschiede zwischen den Smartphones in Bezug auf ihre physischen Abmessungen, aber die Ausstattung unterscheidet sich wesentlich stärker (z.B. die verbauten Prozessoren, Akku-Kapazität etc.). Die Hüllen können die zu ihnen passenden Smartphones nur über die Abmessungen abbilden. Viele andere Attribute (wie das Material) haben hingegen fast gar nichts mit den komplementären Geräten zu tun.

### Vergleich nach Erforderlichkeit

Bei den Hüllen brachte die Beschränkung der Attribute auf ausschließlich erforderliche oder optionale keine Verbesserung der Cluster. Dieser Versuch wird nun für die Smartphones für die Kombination an numerischen und kategorischen Attributen wiederholt.

Tabelle 5.16: Clustering der Smartphones mit erforderlichen und optionalen Attributen

Auswahl	Stabilität	Qualität	Erkennung		
			<i>Generation</i>	<i>Modell</i>	<i>Duplikate</i>
alle	0.98	0.43	0.65	0.71	0.96
nur erf.	0.91	0.42	-0.04	0.61	0.89
nur opt.	0.93	0.45	0.65	0.60	0.94

Auch bei den Smartphones bringt das Weglassen von Attributen keine Verbesserung des Clusterings. Speziell die Stabilität verschlechtert sich durch die eingeschränkte Auswahl. Interessant ist, dass die optionalen Attribute bessere Cluster produzieren, als die erforderlichen. Eine genauere Analyse würde den Rahmen sprengen (aufgrund der hohen Menge an Attributen). Allgemein lässt sich aber folgern, dass besonders relevante Attribute nicht durch die Einteilung nach erforderlich und optional durch die Icecat-Taxonomie erkennbar sind.

### Vergleich nach menschlicher Auswahl

Auch für die Smartphones sind eine Reihe von Attributen mit besonderer Relevanz (nach Meinung des Autors) ausgewählt worden. Die folgende Tabelle listet diese Attribute auf.

Tabelle 5.17: Ausgewählte Attribute für das Clustering der Smartphones

Name	Typ	erforderlich	non-null	unique
Rear camera resolution (numeric)	numerisch	ja	42	4
Front camera resolution (numeric)	numerisch	ja	42	3
Display diagonal	numerisch	ja	42	8
Pixel density	numerisch	nein	37	11
Weight	numerisch	ja	40	11
Height	numerisch	nein	40	11
Width	numerisch	nein	40	8
Depth	numerisch	nein	40	7
Platform	kategorisch	ja	40	1
Operating system installed	kategorisch	ja	36	3
Mobile network generation	kategorisch	ja	40	2
Native aspect ratio	kategorisch	nein	19	3
Title	string	ja	42	38

Bei der Auswahl fiel auf, dass sehr viele Attribute redundante Informationen enthalten. So gibt es die multi-kategorischen Attribute “3G standards”, “4G bands supported” und “5G bands supported” sowie die kategorischen Attribute “4G standard” und “Mobile network generation”. Alle enthalten sehr ähnliche Informationen und könnten durch ein einziges komprimiertes Attribut repräsentiert werden. Bei der Auswahl der Attribute wurde entsprechend auf eine möglichst repräsentative Menge an Attributen zurückgegriffen (z.B. “Mobile network generation” als Zusammenfassung der zuvor genannten Attribute).

Tabelle 5.18: Clustering der Smartphones mit verschiedenen Gewichtungungen der Attribute

Attribute	Stabilität	Qualität	Erkennung		
			<i>Generation</i>	<i>Modell</i>	<i>Duplikate</i>
num+kat	0.98	0.43	0.65	0.71	0.96
mensch.Ausw.	0.93	0.44	0.30	0.77	0.96

Beim anschließenden Clustering (welches in der obigen Tabelle dargestellt ist) zeigte sich nun ein interessantes Ergebnis. Wenn auch die Stabilität und die Erkennung der Generation sich etwas verschlechtert hat, so liegen alle Metriken entweder etwas besser oder auf gleichem Niveau zu dem Pauschalansatz mit allen numerischen und kategorischen Attributen. Wahrscheinlich lässt sich die Erkennung der Smartphone-Generation auch noch durch Hinzufügen von ein oder zwei weiteren relevanten Attributen verbessern.

Dies wurde zwar nicht weiter analysiert, aber es ist wahrscheinlich, dass die Laufzeit des Clustering durch die beschränkte Auswahl an Attributen sich ebenfalls verbessert (162 Attribute vs. 13 in der menschlichen Auswahl). Auf jeden Fall lässt sich schlussfolgern, dass redundante Attribute getrost weggelassen werden können. Das ist an sich keine durchbrechende Erkenntnis, belegt aber, dass sich das Clustering-Verfahren “logisch” verhält.

In Abbildung 5.6 sind die Stabilität und Qualität des pauschalen Ansatzes und der menschlichen Auswahl nochmal über die verschiedenen Hierarchie-Ebenen dargestellt.

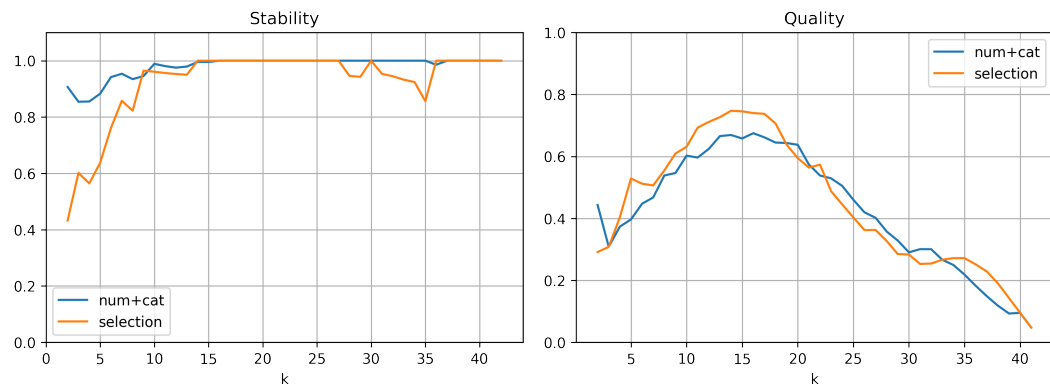


Abbildung 5.6: Stabilität und Qualität des Clusterings der Smartphones nach menschlicher Auswahl

Besonders die Stabilität bei geringen Werten für  $k$  leidet unter der beschränkten Auswahl an Attributen massiv. Dies ist sehr kritisch zu bewerten, weil das bedeutet, dass das Verfahren im relevanten Bereich nicht besonders zuverlässig arbeitet.

Die Qualität liegt im Bereich zwischen  $k = 3$  und  $k = 18$  etwas höher für die menschliche Auswahl. Dies ist der besonders wichtige Abschnitt, in dem auch die Clustereinteilungen für die Metriken zur Erkennung der Generation und der Modelle liegen. In Bezug auf die Qualität ist die Beschränkung der Attribute also empfehlenswert.

Es ist im Folgenden versucht worden, noch andere Attribute zur Auswahl hinzuzufügen, welche die Erkennung der Generation und die Stabilität verbessern – allerdings ohne Erfolg.

## 5.2.4 Attribut-Gewichtung

Zum Schluss ist nochmal die Übergewichtung der als besonders relevant identifizierten Attribute gegenüber dem Rest evaluiert worden. Die folgende Tabelle zeigt die Ergebnisse.

Tabelle 5.19: Clustering der Smartphones mit verschiedenen Gewichtungen der Attribute

Attribute	Gewichtung	Stabilität	Qualität	Erkennung		
				<i>Generation</i>	<i>Modell</i>	<i>Duplikate</i>
num+kat	gleichgew.	0.98	0.43	0.65	0.71	0.96
num+kat	mensch.Ausw. x2	0.96	0.42	0.52	0.73	0.96
num+kat	mensch.Ausw. x3	0.93	0.41	0.52	0.67	0.97
alle	mensch.Ausw. x2	0.95	0.39	0.72	0.70	1.00
alle	mensch.Ausw. x3	0.94	0.39	0.72	0.70	1.00

Die erste Zeile zeigt wieder die bisher beste Kombination von numerischen und kategorischen Attributen in der Gleichgewichtung, um direkt den Vergleich zu den anderen Versuchen ziehen zu können.

Werden nur die numerischen und kategorischen Attribute verwendet und die Attribute aus dem vorherigen Abschnitt übergewichtet (Zeile zwei und drei), so verschlechtern sich die Sta-

bilität und die Qualität. Geringfügig besser wird die Erkennung der Modelle und Duplikate, allerdings ist dies im Gegensatz zu Stabilität und Qualität zu vernachlässigen.

Die letzten beiden Zeilen zeigen die Variante, wo alle Attribute für das Clustering verwendet werden plus Übergewichtung der ausgewählten Attribute. Dadurch verbessern sich die Metriken für die Erkennung; Stabilität und Qualität sinkt etwas ab.

Insgesamt bringt die unterschiedliche Gewichtung keine signifikanten Verbesserungen der Cluster.

## 5.3 Kombiniertes Datenset

Zum Abschluss der Versuche ist nochmal das gesamte Datenset (Hüllen und Smartphones gemeinsam) geclustert worden.

### 5.3.1 Auswahl aus allen Attributen

Für beide Teilssets ist die Kombination numerischer und kategorischer Attribute als die potenteste ermittelt worden. Besonders für die Smartphones brachte die menschliche Vorauswahl von Attributen vergleichbare Ergebnisse mit deutlich weniger Attributen. Die Übergewichtung von Attributen brachte hingegen kaum positive Veränderungen der Cluster. Und schließlich hat die alleinige Verwendung der String-Attribute bei beiden Sets zumindest durchschnittliche Ergebnisse produziert. Daher sind alle diese Varianten nun beim Clustering des gesamten Datensets ebenfalls erneut zum Einsatz gekommen. Die folgende Tabelle zeigt die Ergebnisse.

Tabelle 5.20: Clustering des gesamten Datensets

Attribute	Stabilität	Qualität	Erkennung			
			<i>Familie</i>	<i>Generation</i>	<i>Modell</i>	<i>Duplikate</i>
num+kat	0.80	0.49	1.00	0.59	0.66	0.97
mensch.Ausw.	0.92	0.34	1.00	0.41	0.63	0.97
num+kat & m.Aus. x2	0.91	0.49	1.00	0.71	0.70	0.97
alle & m.Aus. x2	0.95	0.33	1.00	0.79	0.71	0.97
strings	0.88	0.26	1.00	0.61	0.58	1.00

Die ermittelten Metriken sind alle bereits bekannt. Für die Erkennung ist aber eine neue Spalte “Familie” hinzugekommen. Hier wird überprüft, ob im ersten Split des Datensets alle Hüllen in eine Gruppe und alle Smartphones in die andere Gruppe sortiert werden. Diese Einteilung ist wie gewohnt mit Adjusted-Rand-Index berechnet worden. Die Erkennung der Generationen und Modelle erfolgt entsprechend auf den darauf folgenden Hierarchie-Ebenen. Für die Hüllen ist dabei die vorherige Unterteilung nach Herstellern ebenfalls beachtet worden.

Für die “menschliche Auswahl” sind die als relevant eingeschätzten Attribute der Hüllen und Smartphones kombiniert worden. Zwischen beiden Gruppen bestand sowieso schon eine

gewisse Ähnlichkeit (beide enthalten z.B. “Width”, “Height” und “Depth”). Allerdings ist dieses Vorgehen nicht auf beliebige Datensets übertragbar, da u.U. die besonders relevanten Attribute einer Produktfamilie genau die irrelevantesten einer anderen darstellen können. Alle Versuch mit dieser Auswahl sind also entsprechend kritisch zu sehen.

Zunächst fällt auf, dass alle Clusterings die beiden Produktfamilien direkt im ersten Split eindeutig voneinander trennen. Ebenso erkennen alle Verfahren die Duplikate nahezu perfekt.

In den Versuchen mit jeder Produktfamilie einzeln hat die Kombination numerisch und kategorisch eigentlich stets mit die höchsten Werte für die Stabilität aufgewiesen. Auf das gesamte Set angewandt, lieferte diese Kombination im Vergleich die schlechtesten Ergebnisse in dieser Metrik. Dafür liegt die Qualität für diese Kombination wiederum am höchsten.

Die Erkennung der Smartphone-Generation und -Modelle liegt mit 0.59 und 0.66 für die Kombi aus numerischen und kategorischen Attributen auf einem mittelmäßigen aber akzeptablen Niveau, welches auch den Ergebnissen der Versuche mit den einzelnen Produktfamilien entspricht. Die Clusterings, in denen mit Übergewichtung von Attributen gearbeitet worden ist (Zeile drei und vier), können diese Erkennungsfähigkeit aber auf Werte von 0.79 bzw. 0.71 steigern. Bei einer genaueren Analysen ist deutlich geworden, dass vor allem die Smartphones nicht sehr zuverlässig den richtigen Generationen und Modellen zugeordnet werden konnten. Die Vermutung daraus ist, dass die hohe Menge an redundanten Attributen hinderlich für eine bessere Erkennung und Einordnung der Smartphones ist. Diese Versuche müssten also unbedingt mit einem besseren Datenset wiederholt werden.

Die ausschließliche Verwendung von String-Attributen zeigt auch hier wieder das Verhalten aus den Einzelversuchen. Die Qualität wird sehr schlecht bewertet, jedoch weisen alle anderen Metriken akzeptable Werte und besonders die Duplikat-Erkennung sogar den Höchstwert auf.

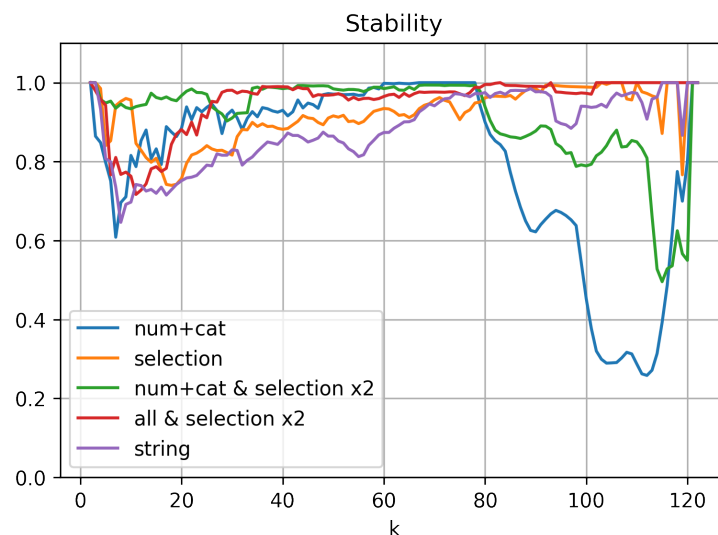


Abbildung 5.7: Stabilität des Clustering des gesamten Datensets

In Abbildung 5.7 ist ein genauerer Blick in das Verhalten der Stabilität über die verschiedenen Hierarchie-Ebenen geworfen worden. Vor allem die Kombination numerisch und kategorisch verzeichnet auf den ersten und auf den letzten Hierarchie-Stufen massive Einbrüche

in der Stabilität. Werden hingegen die relevanten numerischen und kategorischen Attribute übergewichtet (grüne Linie), so stabilisiert sich das Clustering vor allem auf den wichtigen ersten Ebenen. Das stützt die These, dass unter den numerischen und kategorischen Attributen eine ganz Reihe von “störenden” Werten liegen. Werden diese weniger stark gewichtet, so verbessert sich die Stabilität enorm. Das Datenset müsste also vor allem in Bezug auf die vielen redundanten Attribute bei den Smartphones überarbeitet werden.

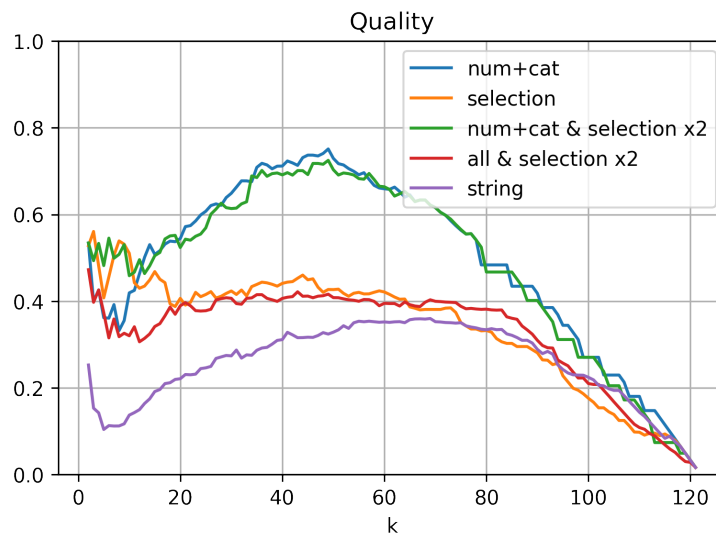


Abbildung 5.8: Qualität des Clustering des gesamten Datensets

In Abbildung 5.8 ist der Silhouetten-Koeffizient für die verschiedenen Werte von  $k$  dargestellt. Die Kombination numerisch und kategorisch ist hier eindeutig den anderen Varianten überlegen. Interessant ist, dass bei der Gleichgewichtung (blaue Linie) die Werte am Anfang (bis  $k = 16$ ) zunächst massiv einbrechen, bevor sie auf das Niveau der Variante mit übergewichteten relevanten Attributen (grüne Linie) kommt. Dies kann als weiterer Beweis für die schlechte Datenqualität der Smartphones gewertet werden.

### 5.3.2 Verwendung gemeinsamer Attribute

In einem letzten Versuch wurde geprüft, ob das Clustering die zueinander passenden Hüllen und Smartphones in gemeinsame Gruppen sortieren kann. Dafür ist das Clustering ausschließlich mit den Attributen erfolgt, welche in beiden Produktfamilien verwendet werden. Die folgende Tabelle zeigt diese gemeinsamen Attribute.

Tabelle 5.21: Gemeinsame Attribute von Hüllen und Smartphones

Name	Typ	Hüllen	Smartphones	non-null	unique
Height	numerisch	opt.	opt.	64	22
Width	numerisch	opt.	opt.	64	17
Depth	numerisch	opt.	opt.	64	18
Weight	numerisch	opt.	erf.	64	22
Brand	kategorisch	erf.	erf.	122	4
Short Description	string	erf.	erf.	113	75

Name	Typ	Hüllen	Smartphones	non-null	unique
Short Summary	string	erf.	erf.	122	118
Title	string	erf.	erf.	122	118

Nach dem Clustering wurde wieder die Zuteilung für  $k = 3$  mit den Smartphone-Generationen mittels Adjusted-Rand-Index auf ihre Ähnlichkeit überprüft. Diese lag hier bei mageren **0.04**. Für  $k = 11$  und die Übereinstimmung mit den Smartphone-Modellen lag der Werte nur bei **0.16**.

Die Erkennung von zueinander passenden Hüllen und Smartphones kann also durch die Clusteranalyse nicht erreicht werden.

## 6 Fazit und Ausblick

Im Rahmen dieser Masterarbeit ist überprüft worden, ob das sinnvolle Clustern von komplexen Datenstrukturen in Form von Produktdaten möglich ist und wenn ja – auf welche Art und Weise. Dazu sollte ein Clustering-Verfahren entwickelt werden, welches in der Lage ist, Produktdaten, wie sie in typischen Product-Information-Management-Systemen vorkommen, zu clustern. Als Referenz wurde dabei die Open-Source-Lösung Akeneo-PIM verwendet. Die Produkte in solchen PIM-Systemen zeichnen sich durch einen hohen Grad an Strukturiertheit aus. Gleichzeitig kommen eine Vielzahl von Attributen verschiedenster Datentypen vor. Ebenso sind fehlende Werte (`null-Values`) keine Seltenheit.

Bevor ein Clustering-Verfahren erarbeitet worden ist, wurde zunächst ein Überblick zu den vielfältigen Ansätzen gegeben, welche für die Durchführung einer Clusteranalyse existieren. Es wurden verschiedene Arten von Distanz- und Ähnlichkeitsmaßen vorgestellt, welche die Nähe bzw. Ähnlichkeit zwischen verschiedenen Datenpunkten quantifizieren können. Damit einher gehen meistens verschiedene Arten der Daten-Vorverarbeitung, welche ebenfalls betrachtet worden sind. Anschließend wurde ein Überblick zu verschiedenen gängigen Clustering-Verfahren geben, wie sie funktionieren und welche Eigenschaft sie aufweisen. Außerdem sind unterschiedliche Methoden und Metriken vorgestellt worden, mit denen bewertet werden kann, ob ein Clustering-Verfahren eher gut oder eher schlecht arbeitet.

Aus diesem breiten Spektrum ist anschließend ein Konzept erstellt worden, welches in der Lage sein müsste, komplexe Produktdaten zu clustern. Wichtig war dabei, dass das Clustering-Verfahren hierarchisch arbeitet, da sich hieraus mehr Erkenntnisse ableiten lassen. Ebenso sollte die vorherige Verarbeitung der Daten auf ein Mindestmaß reduziert sein, damit die ursprünglichen Werte weniger stark verfälscht werden müssen. Hinzu kamen weitere Aspekte, wie eine möglichst geringe Laufzeit, um auch große Mengen an Produkten verarbeiten zu können sowie eine Resilienz gegenüber `null`-Werten. Als Basis-Verfahren wurde schließlich der Bisecting K-Means ausgewählt, welcher als recht effiziente Variante des Top-down-Clusterings für Datensets mit numerischen Attributen gilt. Da es eine Variante des K-Means gibt, die sowohl numerische als auch kategorische Attribute verarbeiten kann – den K-Prototypes – ist als Clustering-Verfahren final eine Kombination dieser Verfahren als “Bisecting K-Prototypes” definiert worden. Diese Kombination der Verfahren ist neuartig und wurde so in der Literatur noch nicht beschrieben.

Mit numerischen und kategorischen Daten können bereits viele Attribute in Akeneo-PIM für die Clusteranalyse verwendet werden. Bei der weiteren Analyse traten aber weitere Datentypen zutage, die ebenfalls in dieser Form nirgendwo beschrieben sind. Sog. multi-kategorische Attribute weisen als Werte eine beliebige Menge an vorher definierten Labels auf. Sie sind also nicht einer Kategorie zugeordnet, sondern mehreren. Anstatt diesen Typen zu ignorieren oder auf einfache kategorische Werte zu verkürzen, wurde der Jaccard-Koeffizient benutzt, um die Übereinstimmung zwischen zwei Datenpunkten für jedes multi-kategorische Attribut einzeln zu bestimmen und anschließend aufzusummieren. Dieses Vorgehen wurde



ebenfalls für die Verarbeitung von String-Attributen verwendet. Durch vorherige Tokenisierung werden aus den Strings faktisch ebenfalls multi-kategorische Attribute. Diese Art der Verarbeitung ist so ebenfalls noch nicht in der Literatur beschrieben und wurde später mit dem alternativen Ansatz der Verarbeitung als einfache kategorische Werte verglichen.

Zur praktischen Überprüfung des erarbeiteten Konzeptes wurde eine Instanz von Akeneo-PIM aufgesetzt und mit Daten aus Icecat – einem umfangreichen Online-Katalog mit Million von Produkten – gefüllt. Dabei sind 42 Smartphones der Firma Samsung aus verschiedenen Generationen importiert worden sowie 80 zu diesen Smartphones passende Hüllen.

Dieses Datenset ist anschließend mit dem erarbeiteten Verfahren geclustert worden. Dabei sind verschiedene Variationen in der Auswahl der Attribute für das Clustering, für die Verarbeitung von den besagten multi-kategorischen und String-Attributen sowie für die Gewichtung der Attribute zueinander ausprobiert worden. Für die Evaluation kamen verschiedene der vorgestellten Metriken zum Einsatz. Zum einen wurde die Stabilität mehrerer Durchläufe des Verfahrens über das gleiche Datenset betrachtet. Ebenso die Qualität in Form des Silhouetten-Koeffizienten, welche angibt wie gut getrennt die gefundenen Cluster voneinander liegen. Außerdem sind im Datenset verschiedene inhärente Strukturen vorhanden (z.B. die Smartphone-Generationen oder Produkt-Duplikate), zu denen geprüft worden ist, ob das Clustering diese intuitiven Strukturen ebenfalls erkennt.

Insgesamt lässt sich sagen, dass das hergeleitete Clustering-Verfahren tatsächlich funktioniert und sinnvolle Cluster in den Produkten finden kann. Dies gilt insbesondere, wenn für das Clustering lediglich die numerischen und kategorischen Attribute verwendet werden. Die Stabilität der Cluster verbesserte sich in den Versuchen zumeist, wenn mehr anstatt weniger viele verschiedene Attribute verwendet worden sind. Jedoch erreichen nur numerische und kategorische Attribute in Kombination Cluster mit hoher Qualität auf den wichtigsten Ebenen der Cluster-Hierarchie.

Ein weiterer Beleg für die Funktionalität des Verfahrens ist, dass durch das Clustering Eigenschaften des Datensets zutage getreten sind, die so vorher noch nicht bekannt waren. Bspw. stammen die Smartphone-Hüllen von vier verschiedenen Herstellern, welche ihre Produktdaten sehr unterschiedlich aufbereiten. Entsprechend teilte das Clustering-Verfahren die Hüllen zuerst nach Hersteller, bevor die anderen angenommenen Strukturen zutage traten.

Die hergeleitete Verarbeitung der multi-kategorischen Attribute hat zwar im direkten Vergleich zu der Verarbeitung als einfach kategorische Attribute bessere Cluster erzeugt, aber in Kombination mit Attributen anderen Typs, verschlechterten sie i.d.R. die Metriken. Dies kann zum einen daran liegen, dass die multi-kategorischen Attribute keine sinnvollen Informationen enthalten haben (siehe das Material bei den Hüllen oder die vielen redundanten Attribute zu Mobilfunk-Standards bei den Smartphones). Zum anderen könnte einfach diese Form der Verarbeitung ungeeignet sein. Hier müssten weitere Versuche mit anderen Datensets durchgeführt werden, um ein abschließendes Urteil zu fällen.

Interessant ist das Ergebnis für die String-Attribute gewesen. Werden nur Attribute dieses Typs für das Clustering verwendet, so entstanden recht adäquate Ergebnisse in den verschiedenen Metriken – wenn auch meistens etwas schlechter als die beschriebene Kombi aus numerischen und kategorischen Attributen. Das lässt sich dadurch erklären, dass Attribute wie “Short Description” oder auch “Title” eine prägnante Zusammenfassung der wichtigsten

Eigenschaften des Produktes enthalten. Dank der hergeleiteten multi-kategorischen Verarbeitung dieser Attribute scheinen diese unstrukturierten Informationen recht effektiv aus den Strings extrahiert werden können. Damit könnten in der Zukunft verschiedene Anwendungen ausprobiert werden. Bspw. könnten durch ein initiales Clustering mit den String-Attributen erste Hinweise auf die Natur eines Datensets gewonnen werden. Auf dieser Grundlage könnte dann entschieden werden, welche Produkteigenschaften in dedizierte numerische bzw. kategorische Attribute herausgezogen werden, um die Cluster eines anschließenden zweiten Durchlaufes mit numerischen und kategorischen Attributen zu verbessern.

Mit der Übergewichtung bestimmter Attribute beim Clustering lassen sich die Ergebnisse tatsächlich geringfügig in eine bestimmte Richtung verschieben (also die inhärenten Strukturen werden etwas besser erkannt). Dieser Effekt ist aber sehr gering. Speziell die Versuche mit den Smartphones haben gezeigt, dass lieber Wert auf eine möglichst hohe Qualität der Daten insgesamt gelegt werden sollte, anstatt eine möglichst geschickte Auswahl der Attribute zu treffen (was sich im Zweifelsfall nur negativ auf die Stabilität auswirkt).

Die größte Einschränkung zu allen durchgeführten Versuchen ist aber, dass das für die Evaluation verwendete Datenset viel zu klein gewesen ist. Insgesamt 142 Produkte aus zwei Produktkategorien von vier verschiedenen Herstellern sind kein Maßstab für Produktkataloge wie sie normalerweise in Online-Shops vorkommen. Alle in dieser Arbeit gewonnen Ergebnisse können also bestenfalls als vorläufig bezeichnet werden.

Hinzu kommt, dass das Datenset mehr oder weniger “blind” aus dem Icecat-Produktkatalog importiert worden ist. Reale Shops würde hier noch einige weitere Schritte der Datenverarbeitung anschließen, um die Daten in eine für ihren Shop und ihre Konventionen passende Form zu bringen. Dies beinhaltet die Anreicherung aus anderen Quellen, die Umwandlung in eigene kompaktere Taxonomien bis hin zur manuellen Aufbereitung der Produkte, um eine entsprechende Datenqualität aufrecht zu erhalten. All das konnte im Rahmen dieser Arbeit nur rudimentär durchgeführt werden. Das Clustering-Verfahren identifizierte im Anschluss sogar mehrere dieser Unzulänglichkeiten im Datenset.

Für die Zukunft sollten also vor allem die Ergebnisse dieser Arbeit an mehreren realen Datensets überprüft werden. Insbesondere ist von Belang, ob die Kombination aus numerischen und kategorischen Attributen auch in anderen Sets als überlege Auswahl an Attributen hervorgeht. Weiterhin sollte die Verarbeitung der multi-kategorischen Attribute erneut auf den Prüfstand gestellt werden. Zum einen sollte dabei geklärt werden, ob sie überhaupt einen sinnvollen Einfluss auf das Clustering haben oder ignoriert werden sollten. Zum anderen ist die Verarbeitung als multi- gegen einfach kategorisch erneut zu testen. Ideen bzgl. der String-Attribute und deren Verarbeitung sind bereits vorgestellt worden.

Erweisen sich diese Versuche an anderen Datensets ebenfalls als sinnvoll, so können Anwendungen für die Clusteranalyse von Produktdaten wie sie im ersten Kapitel diskutiert worden sind, angegangen werden. Speziell für die Erkennung von Duplikaten scheint die Clusteranalyse nach den Ergebnissen dieser Arbeit geeignet zu sein. Ebenso sind Anwendungen in Richtung Erkennung von Anomalien (siehe die Ergebnisse zu den Smartphone-Hüllen) denkbar.

## Quellenverzeichnis

- [Aken22a] AKENEO: *About Akeneo*. URL <https://www.akeneo.com/de/about-us/>. - abgerufen am 2022-04-04
- [Aken22e] AKENEO: *The REST API basics – Overview*. URL <https://api.akeneo.com/documentation/overview.html>. - abgerufen am 2022-04-04
- [Aken22g] AKENEO: *Concepts & resources – Catalog structure*. URL <https://api.akeneo.com/concepts/catalog-structure.html>. - abgerufen am 2022-04-04
- [Aken22h] AKENEO: *REST API endpoints – Create a new attribute*. URL [https://api.akeneo.com/api-reference-17.html#post\\_attributes](https://api.akeneo.com/api-reference-17.html#post_attributes). - abgerufen am 2022-04-04
- [Aken22c] AKENEO: *Recommended configuration*. URL [https://docs.akeneo.com/5.0/technical\\_architecture/technical\\_information/recommended\\_configuration.html](https://docs.akeneo.com/5.0/technical_architecture/technical_information/recommended_configuration.html). - abgerufen am 2022-04-04
- [Aken22j] AKENEO: *Akeneo Icecat Connector | Akeneo App Store*. URL <https://marketplace.akeneo.com/extension/akeneo-icecat-connector>. - abgerufen am 2022-04-14
- [Aken22d] AKENEO: *Install Akeneo PIM for development with Docker*. URL [https://docs.akeneo.com/5.0/install\\_pim/docker/installation\\_docker.html](https://docs.akeneo.com/5.0/install_pim/docker/installation_docker.html). - abgerufen am 2022-04-04
- [Aken22b] AKENEO: *Akeneo PIM in a nutshell*. URL <https://docs.akeneo.com/5.0/index.html>. - abgerufen am 2022-04-04
- [Aken22f] AKENEO: *Concepts & resources – Products*. URL <https://api.akeneo.com/concepts/products.html>. - abgerufen am 2022-04-04
- [Aken22i] AKENEO: *Concepts & resources – Target market settings*. URL <https://api.akeneo.com/concepts/target-market-settings.html>. - abgerufen am 2022-04-05
- [ArVa16] ARORA, PREETI ; VARSHNEY, SHIPRA ; u. a.: Analysis of k-means and k-medoids algorithm for big data. In: *Procedia Computer Science* Bd. 78, Elsevier (2016), S. 507–512
- [Bos12] BOSLAUGH, SARAH: *Statistics in a nutshell: A desktop quick reference* : O'Reilly Media, 2012
- [Cha07] CHA, SUNG-HYUK: Comprehensive survey on distance/similarity measures between probability density functions. In: *City* Bd. 1 (2007), Nr. 2, S. 1
- [ChZhYi19] CHEN, HONGSHEN ; ZHAO, JIASHU ; YIN, DAWEI: Fine-grained product categorization in e-commerce. In: *Proceedings of the 28th ACM International Conference on Information and Knowledge Management*, 2019, S. 2349–2352
- [CRF03] COHEN, WILLIAM W ; RAVIKUMAR, PRADEEP ; FIENBERG, STEPHEN E ; u. a.: A Comparison of String Distance Metrics for Name-Matching Tasks. In: *IJWeb*. Bd. 3 : Citeseer, 2003, S. 73–78
- [Cui21] CUI, YIMIN: Intelligent recommendation system based on mathematical modeling in personalized data mining. In: *Mathematical Problems in Engineering* Bd. 2021, Hindawi (2021)

- [DaBo79] DAVIES, DAVID L ; BOULDIN, DONALD W: A cluster separation measure. In: *IEEE transactions on pattern analysis and machine intelligence*, IEEE (1979), Nr. 2, S. 224–227
- [DE22] DE, SAMSUNG: *Galaxy S Serie*. URL <https://www.samsung.com/de/smartphones/galaxy-s/>. - abgerufen am 2022-04-05
- [Defa77] DEFAYS, DANIEL: An efficient algorithm for a complete link method. In: *The Computer Journal* Bd. 20, Oxford University Press (1977), Nr. 4, S. 364–366
- [DoBi22] DOGAN, ALICAN ; BIRANT, DERYA: K-centroid link: a novel hierarchical clustering linkage method. In: *Applied Intelligence* Bd. 52, Springer (2022), Nr. 5, S. 5537–5560
- [Foun22] FOUNDATION, THE APACHE SOFTWARE: *BisectingKMeans – PySpark 3.2.1 documentation*. URL <https://spark.apache.org/docs/latest/api/python/reference/api/pyspark.ml.clustering.BisectingKMeans.html>. - abgerufen am 2022-04-14
- [Hamm50] HAMMING, RICHARD W: Error detecting and error correcting codes. In: *The Bell system technical journal* Bd. 29, Nokia Bell Labs (1950), Nr. 2, S. 147–160
- [Hart75] HARTIGAN, JOHN A: *Clustering algorithms* : John Wiley & Sons, Inc., 1975
- [Huan98] HUANG, ZHEXUE: Extensions to the k-means algorithm for clustering large data sets with categorical values. In: *Data mining and knowledge discovery* Bd. 2, Springer (1998), Nr. 3, S. 283–304
- [HuAr85] HUBERT, LAWRENCE ; ARABIE, PHIPPS: Comparing partitions. In: *Journal of classification* Bd. 2, Springer (1985), Nr. 1, S. 193–218
- [Icec22a] ICECAT: *About Icecat*. URL <https://icecat.com/about-us/>. - abgerufen am 2022-04-05
- [Icec22b] ICECAT: *Icecat: open feed with product information, data-sheets for ecommerce*. URL <https://icecat.biz/en/menu/manufacturers/index.html>. - abgerufen am 2022-04-13
- [Jaro95] JARO, MATTHEW A: Probabilistic linkage of large public health data files. In: *Statistics in medicine* Bd. 14, Wiley Online Library (1995), Nr. 5-7, S. 491–498
- [JiCh17] JIA, HONG ; CHEUNG, YIU-MING: Subspace clustering of categorical and numerical data with an unknown number of clusters. In: *IEEE transactions on neural networks and learning systems* Bd. 29, IEEE (2017), Nr. 8, S. 3308–3325
- [KaRo09] KAUFMAN, LEONARD ; ROUSSEEUW, PETER J: *Finding groups in data: an introduction to cluster analysis*. Bd. 344 : John Wiley & Sons, 2009
- [King15] KING, RONALD S: *Cluster analysis and data mining: An introduction* : Stylus Publishing, LLC, 2015
- [KoLo12] KOU, GANG ; LOU, CHUNWEI: Multiple factor hierarchical clustering algorithm for large scale web page and search engine clickstream data. In: *Annals of Operations Research* Bd. 197, Springer (2012), Nr. 1, S. 123–134
- [KRRT01] KUMAR, RAVI ; RAGHAVAN, PRABHAKAR ; RAJAGOPALAN, SRIDHAR ; TOMKINS, ANDREW: Recommendation systems: A probabilistic analysis. In: *Journal of Computer and System Sciences* Bd. 63, Elsevier (2001), Nr. 1, S. 42–61
- [MiCo88] MILLIGAN, GLENN W ; COOPER, MARTHA C: A study of standardization of variables in cluster analysis. In: *Journal of classification* Bd. 5, Springer (1988), Nr. 2, S. 181–204

- [MWDM64] MACNAUGHTON-SMITH, P ; WILLIAMS, WT ; DALE, MB ; MOCKETT, LG: Dissimilarity analysis: a new technique of hierarchical sub-division. In: *Nature* Bd. 202, Nature Publishing Group (1964), Nr. 4936, S. 1034–1035
- [OhKi19] OH, YOORI ; KIM, YOONHEE: A resource recommendation method based on dynamic cluster analysis of application characteristics. In: *Cluster Computing* Bd. 22, Springer (2019), Nr. 1, S. 175–184
- [Pimc22] PIMCORE: *What, why and how of product information management*. URL <https://pimcore.com/en/what-is-pim>. - abgerufen am 2022-04-04
- [PWMO19] PAPP, STEFAN ; WEIDINGER, WOLFGANG ; MEIR-HUBER, MARIO ; ORTNER, BERNHARD ; LANGS, GEORG ; WAZIR, RANIA: *Handbuch Data Science: Mit Datenanalyse und Machine Learning Wert aus Daten generieren* : Carl Hanser Verlag GmbH Co KG, 2019
- [RAAQ11] RENDÓN, ERÉNDIRA ; ABUNDEZ, ITZEL ; ARIZMENDI, ALEJANDRA ; QUIROZ, ELVIA M: Internal versus External cluster validation indexes. In: *International Journal of computers and communications* Bd. 5 (2011), Nr. 1, S. 27–34
- [Rand71] RAND, WILLIAM M: Objective criteria for the evaluation of clustering methods. In: *Journal of the American Statistical association* Bd. 66, Taylor & Francis (1971), Nr. 336, S. 846–850
- [RaRa11] RAJALINGAM, N ; RANJINI, K: Hierarchical Clustering Algorithm - A Comparative Study. In: *International Journal of Computer Applications* Bd. 19, Citeseer (2011), Nr. 3, S. 42–46
- [Rous87] ROUSSEUW, PETER J: Silhouettes: a graphical aid to the interpretation and validation of cluster analysis. In: *Journal of computational and applied mathematics* Bd. 20, Elsevier (1987), S. 53–65
- [RoZa09] ROBERTSON, STEPHEN ; ZARAGOZA, HUGO: *The probabilistic relevance framework: BM25 and beyond* : Now Publishers Inc, 2009
- [scik22] SCIKIT-LEARN: *2.3. Clustering – scikit-learn 1.0.2 documentation*. URL <https://scikit-learn.org/stable/modules/clustering.html>. - abgerufen am 2022-04-14
- [Sibs73] SIBSON, ROBIN: SLINK: an optimally efficient algorithm for the single-link cluster method. In: *The computer journal* Bd. 16, Oxford University Press (1973), Nr. 1, S. 30–34
- [Stei04] STEINLEY, DOUGLAS: Properties of the Hubert-Arable Adjusted Rand Index. In: *Psychological methods* Bd. 9, American Psychological Association (2004), Nr. 3, S. 386
- [StKaKu00] STEINBACH, MICHAEL ; KARYPIS, GEORGE ; KUMAR, VIPIN: A comparison of document clustering techniques (2000)
- [Vos22] VOS, NICO DE: *nicodv/kmodes: Python implementations of the k-modes and k-prototypes clustering algorithms, for clustering categorical data*. URL <https://github.com/nicodv/kmodes>. - abgerufen am 2022-04-14

## Anhang

- [Link zum Repo](#)
- [Überblick zum Repo](#)

## Selbstständigkeitserklärung

Ich, Hannes Dröse, versichere hiermit, dass ich die vorliegende Masterarbeit mit dem Thema

*Generisches Clustern hoch-komplexer Produktdaten*

selbstständig und nur unter Verwendung der angegebenen Quellen und Hilfsmittel angefertigt habe.

Erfurt, den 25.04.2022

.....

Hannes Dröse