
Magneticum superclusters

Andreas Hofmann

FACULTY OF PHYSICS
LUDWIG-MAXIMILIANS-UNIVERSITY
MUNICH

Bachelor Thesis

Supervised by
PD Dr. Klaus Dolag

Munich, 31. Juli 2017

Magneticum Superhaufen

Andreas Hofmann

FAKULTÄT FÜR PHYSIK
LUDWIG-MAXIMILIANS-UNIVERSITÄT
MÜNCHEN

Bachelor Arbeit

Betreut durch
PD Dr. Klaus Dolag

München, den 31. Juli 2017

Inhaltsverzeichnis

1. Einleitung: Was sind Superhaufen ?	7
2. Theoretische Grundlagen	9
2.1. Methoden zur Festlegung eines Superhaufens	9
2.1.1. Eigenbewegung	9
2.1.2. Friends-of-Friends Algorithmus - Linking Length	10
2.2. Vergleich zwischen verschiedenen Katalogen	16
3. REFLEX II Superhaufen Katalog	17
3.1. Allgemeines	17
3.2. Eigenschaften von Superhaufen	18
4. Zusammensetzung von Superhaufen unter physikalischen Bedingungen	21
4.1. Grundlagen	21
4.1.1. Newtonsches Gravitationsgesetz	22
4.1.2. Eigenbewegung und Hubble-Expansion	23
4.2. Theoretisches Prinzip und Berechnung	24
4.3. Resultate für Box 2b	24
4.4. Vergleich der Resultate aus Box 2b mit den REFLEX II Beobachtungen . .	31
4.5. Resultate für Box 0	35
4.6. Vergleich der Resultate aus Box 0 mit den REFLEX II Beobachtungen . .	38
5. Fazit	41
Literatur	41
Abbildungsverzeichnis	43
A. Erklärung zur Bachelorarbeit	47
B. C++ - Programmcode	49

1. Einleitung: Was sind Superhaufen ?

Der folgende Abschnitt erläutert die fundamentalen Eigenschaften und die Definition eines Superhaufens. Der Text basiert im Wesentlichen auf Chon et al. (2014) 'Characterising superclusters with the galaxy cluster distribution' und Chon et al. (2015) 'On the definition of superclusters'.

Mittels modernster Beobachtungstechnik ist es uns möglich, weit entfernte Galaxien mit einem Teleskop zu beobachten. Vergrößert man den betrachteten Ausschnitt, so sind viele Galaxien oder sogar ein Galaxienhaufen erkennbar. Ein Galaxienhaufen setzt sich aus einzelnen bis hin zu mehreren tausend aneinander gebundener Galaxien zusammen und besitzt eine durchschnittliche Masse von 10^{14} bis 10^{15} Sonnenmassen¹.

Die derzeit größten beobachteten Materiestrukturen in unserem Universum sind Superhaufen. Diese setzen sich aus mindestens zwei untereinander gravitativ gebundener Galaxienhaufen zusammen. Meistens werden Superhaufen als Ansammlung von Galaxienhaufen betrachtet. Die Größe / Ausdehnung² variiert zwischen zehn Mpc bis hin zu 150 Mpc/h. Deren Auftreten ist unregelmäßig, großräumig, abgeflacht und nicht sphärisch symmetrisch. Dennoch liefern sie trotz der großen Ausdehnung Informationen über die Anfangsbedingungen der Strukturbildung des jungen Universums. Superhaufen besitzen weder eine zentrale Massenkonzentration noch scharfe Bindungen mit anderen Strukturen.

Der erste Beleg für Superhaufen als Anhäufung von Galaxienhaufen stammt von George Abell³ aus dem Jahre 1961. Deren Existenz wird von Bogart & Wagoner (1973) und durch andere Forscher bestätigt und zahllose Kataloge zur Klassifikation von Superhaufen werden veröffentlicht.

Die ersten Kataloge basieren aufgrund der damals noch nicht so hoch entwickelten Beobachtungstechnik rein auf dem optischen Aussehen (z.B. Farbe, Helligkeit) der beobachteten Objekte. Es existieren keine festgelegten Kriterien, nach denen die Kataloge strukturiert und die Superhaufen selektiert werden. Daher eignen sie sich nicht um Eigenschaften von Superhaufen zu studieren oder diese mit Ergebnissen von Simulationen zu vergleichen.

Einasto et al. (2001) verwendeten als erste Galaxienhaufen, ausgewählt durch die ausgesandten Röntgenstrahlen der Objekte, um nach Superhaufen zu suchen. Diese Galaxienhaufen liefern gute Hinweise für Strukturen über eine große Skala, da die Leuchtkraft der Röntgenstrahlung stark mit der jeweiligen Masse des beobachteten Objekts korreliert.

Beobachtungen des Röntgenspektrums erlauben die Zusammenstellung eines Katalogs

¹ $M_{\odot} = 1,989 \cdot 10^{30}\text{kg}$

² $h = 0,6774$

³amerikanischer Astronom (1927-1983)

unter dem Kriterium der Massenverteilung. Chon et al. (2013) präsentieren somit einen neuen Katalog, basierend auf der erweiterten ROSET-ESO Flux Limited X-Ray Superhaufen Beobachtung (REFLEX II). Dieser beinhaltet 164 Superhaufen mit einer Rotverschiebung von $z \leq 0.4$ und basiert auf einem klar definierten Auswahlkriterium, dem Friends-of-Friends Algorithmus.

Das Ziel dieser Bachelorarbeit ist der Vergleich der Anzahl und der Eigenschaften der in den Magneticum Boxen 0 und 2b gefundenen Superhaufen mit den Ergebnissen der REFLEX II Beobachtung. Für beide Boxen⁴ sind vereinzelt Daten⁵ vorhanden, sodass innerhalb jeder Box nach Superhaufen gesucht werden kann.

In Kapitel 2 werden die theoretischen Grundlagen zur Zusammenstellung von Superhaufen erläutert. Insbesondere wird auf den Schlüsselparametern des Superhaufen Katalogs der REFLEX II Beobachtung eingegangen, den Friends-of-Friends Algorithmus und dessen Abhängigkeit von der jeweiligen Materieüberdichte.

Kapitel 3 befasst sich mit dem REFLEX II Superhaufen Katalog. Die gefundenen Strukturen können hinsichtlich ihrer Multiplizität und Ausdehnung untersucht werden. Des Weiteren wird das Verhalten der REFLEX II Superhaufen untersucht.

Die eigenen Resultate aus beiden Magneticum Boxen und der Weg zu den Resultaten wird in Kapitel 4 wiedergegeben. Die erhaltenen Ergebnisse werden mit dem Reflex II Superhaufen Katalog hinsichtlich der Ausdehnung und der Multiplizität verglichen.

In Kapitel 5 werden die wichtigsten Punkte der Bachelorarbeit zusammengefasst und die Ergebnisse diskutiert.

⁴3D Volumen welches eine große Zahl an Objekten beinhaltet

⁵Position, Masse, Eigengeschwindigkeit, etc.

2. Theoretische Grundlagen

Dieses Kapitel beschreibt verschiedene Methoden um Superhaufen innerhalb unseres Universums zu finden. Dabei wird insbesondere auf den Friends-of-Friends Algorithmus eingegangen, der die Grundlage für den REFLEX II Superhaufen Katalog bildet. Das Folgende basiert größtenteils auf Chon et al. (2013) 'The extended ROSAT-ESO Flux-Limited X-ray Galaxy Cluster Survey (REFLEX II) - III. Construction of the first flux-limited supercluster sample'.

Um Superhaufen zu finden, benötigt man ein Konzept, um große Strukturen zu detektieren. Diese Strukturen besitzen eine größere Dichte als der umgebende Raum, daher spricht man auch von einer Überdichte an Materie. Somit wird nach Regionen mit einer Überdichte gesucht, bei denen man davon ausgeht, dass sie in naher bzw. ferner Zukunft kollabieren. Man nimmt an, diese Regionen sind kugelförmig und verfügen über eine homogene Dichte.

Es gibt verschiedene Methoden, um nach Superhaufen zu suchen. Diese werden im Folgenden vorgestellt. [3]

2.1. Methoden zur Festlegung eines Superhaufens

2.1.1. Eigenbewegung

Die wesentlichen Gedanken dieses Abschnitts werden Chon et al. (2015) 'On the definition of superclusters' entnommen.

Die zukünftigen Entwicklungen von großflächigen Strukturen lassen sich durch die Eigenbewegung der jeweiligen Objekte voraussagen. Dafür ist es erforderlich, die jeweiligen Geschwindigkeiten der beteiligten Objekte zu kennen. Damit lässt sich ein Geschwindigkeitsfeld erstellen und Aussagen über die zukünftige Entwicklung treffen.

Durch das Geschwindigkeitsfeld können bessere Ergebnisse erzielt werden als durch die Dichteverteilung der Materie, da hier eine genauere Betrachtung der einzelnen Objekte möglich ist. Aufgrund dessen ist es umsetzbar, Gravitationspotentiale und die Eigenbewegung der Objekte zu vergleichen und somit festzustellen, ob Objekte aneinander gebunden sind. Allerdings sind in den heutigen astronomischen Beobachtungen Geschwindigkeitsdaten nur für sehr nah gelegene Regionen verfügbar. Für andere Bereiche kann man hier nur auf die jeweiligen Überdichten zurückgreifen, da die Geschwindigkeiten mit der aktuellen Technik in großen Entfernungen noch nicht messbar sind.

Des Weiteren ist es ebenso möglich, Superhaufen unter einem anderen Kriterium zu finden. Hierfür ist es erforderlich eine bestimmte Überdichte an Materie innerhalb eines bestimmten Gebietes vorzufinden. Dieses Verfahren wird im nächsten Abschnitt genauer

dargestellt.

Im Folgenden wird das Kriterium basierend auf dem Überdichteparameter f erläutert, da dies verwendet wird, um aus der REFLEX II Beobachtung einen Superhaufen-Katalog zusammenzustellen. Dafür ist es erforderlich, sich mit dem Friends-of-Friends Algorithmus⁶ auseinanderzusetzen.

2.1.2. Friends-of-Friends Algorithmus - Linking Length

Mittels dem Friends-of-Friends Algorithmus werden Superhaufen Kataloge zusammengestellt. Dieser Algorithmus wird für den REFLEX II Superhaufen Katalog als zentrales Kriterium verwendet. Dieser sucht nach Galaxienhaufen innerhalb einer bestimmten Länge / eines bestimmten Radius einer Kugelschale, definiert als Linking Length⁷ l . Dieser Parameter gibt die Art des Superhaufen-Katalogs an, da das spezielle Aussehen der Superhaufen stark von der Wahl der Linking Length abhängt. Um nun mittels des Friends-of-Friends Algorithmus einen Superhaufen zu finden, beginnt man mit einem Galaxienhaufen, verwendet diesen als Zentrum und bildet um ihn herum eine Kugelschale mit Radius l . Alle Galaxienhaufen innerhalb dieser Kugelschale gehören somit zu diesem ersten System und werden hier als „Friends“ bezeichnet. Mittels weiterer Kugelschalen mit Radius l um die bereits gefundenen Galaxienhaufen wird nach weiteren „Friends“ gesucht. Alle Galaxienhaufen, die sich nun innerhalb dieser Kugelschalen befinden, gehören zu einem Superhaufen. Bevor man den Friends-of-Friends Algorithmus anwenden kann, muss zuerst die Linking Length, also der Radius der Kugelschalen, festgelegt werden.

Somit entscheidet die Wahl der Linking Length darüber, ob ein Galaxienhaufen zu einem Superhaufen gehört oder nicht. Es ist erforderlich einen passenden Wert zu verwenden. Wird l zu klein gewählt, so werden nur Galaxienhaufen in nächster Nähe des Zentrums mit einbezogen. Somit werden wesentliche Bestandteile eines potentiellen Superhaufens weggelassen und nur die Kerne bzw. innersten Regionen berücksichtigt. Bei einer zu großen Linking Length werden viele vereinzelter Strukturen zusammengefasst und bilden eine sehr große Struktur. Diese sind weder gravitativ untereinander gebunden, noch handelt es sich bei allen ausgewählten Objekten um Galaxienhaufen.

Die Wahl einer einheitlichen Linking Length ist leider nicht möglich, da die Zahl der Galaxienhaufen bei der Betrachtung einer höheren Rotverschiebung stark abnimmt. Die Linking Length wäre viel zu groß, um nahegelegene Superhaufen zu betrachten, da hier die Materiedichte viel größer ist. Gleichmaßen ist der Wert bei hohen Rotverschiebungen, aufgrund der abnehmenden Dichte, viel zu gering.

Der Superhaufen-Katalog von Zucca et al. (1993) bestimmt die Linking Length mittels einer Überdichte. Diese ist hier definiert als:

$$l = (n_0 \cdot f)^{-1/3} \quad (2.1.1)$$

Dabei beschreibt f den Überdichte-Parameter und n_0 die durchschnittliche Galaxienhaufendichte. Nun ist es noch erforderlich den Überdichteparameter zu bestimmen.

⁶Dieser basiert auf dem Überdichte-Parameter

⁷charakteristische Verbindungslänge

Der Friends-of-Friends Algorithmus besitzt als Parameter die Linking Length. Um diese zu bestimmen, ist es nun noch erforderlich, die jeweilige Überdichte zu kennen.

Überdichte Parameter f

Um nun nach Superhaufen suchen zu können, muss noch der Überdichte-Parameter f bestimmt werden. Dieser setzt sich aus der lokalen Galaxienhaufendichte n im Vergleich zur mittleren / durchschnittlichen Galaxienhaufendichte n_0 zusammen. Es gilt:

$$f = \frac{n}{n_0} \quad (2.1.2)$$

Die lokale Dichte n ist gegeben durch: $n \approx l^{-3}$ (mit l : Linking Length)

Das Modell von Zucca et al. (1993) nutzt ein festgelegtes Volumen. Daher kann für das ganze Modell die selbe Linking Length, unabhängig von der jeweiligen Rotverschiebung, verwendet werden. Innerhalb eines Rotverschiebungsbereiches gilt somit für das verwendete Volumen:

$$V = \frac{A}{3} [d_c(z_{\max}^3) - d_c(z_{\min}^3)] \quad [V] = \text{Mpc}^3 \quad (2.1.3)$$

Hier gilt:

- $A = 4, 24sr$: Beobachtetes Gebiet bei der Reflex II Beobachtung⁸
- $d_c(z_i)$: Distanz bei Rotverschiebung z_i ($i = \text{max}, \text{min}$)

Daraus kann die mittlere Galaxienhaufendichte n_0 bestimmt werden:

$$n_0 = \frac{N}{V} \quad [n_0] = \text{Mpc}^{-3} \quad (2.1.4)$$

mit N : Anzahl der Galaxienhaufen bei gegebener Rotverschiebung.
Für die Linking Length gilt:

$$l = (n_0 f)^{-1/3} \quad (2.1.5)$$

Aus Gleichung (2.1.3)-(2.1.5) folgt, dass die Linking Length von der Wahl des Überdichte-parameters f und dem Bereich der Rotverschiebung Δz abhängt.

⁸sr: Steradian, ist eine Maßeinheit für den Raumwinkel

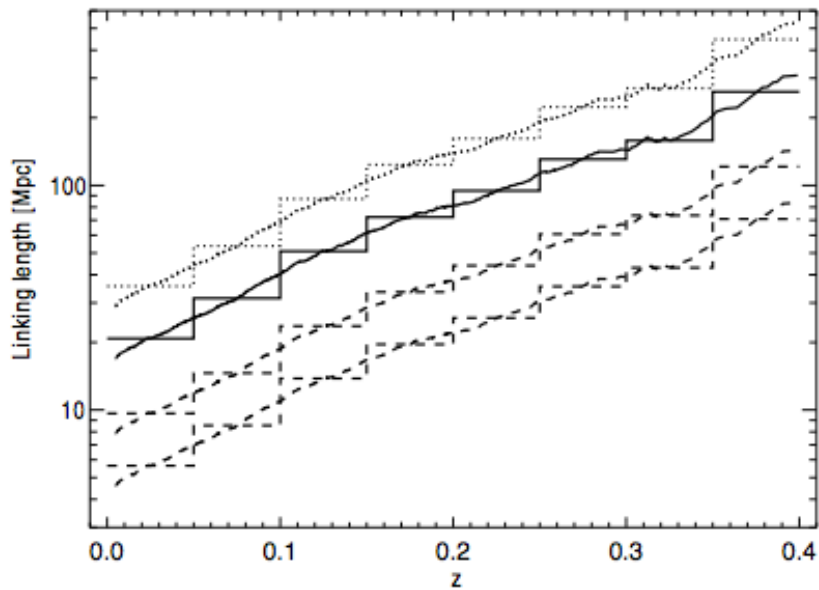


Abbildung 2.1.: Linking Length als Funktion der Rotverschiebung der Galaxienhaufen, $f = 2$ gepunktete Linie, $f = 10$ durchgezogene Linie, $f = 100$; 500 gestrichelte Linie

Credits: Chon et al. (2013) ' The extended ROSAT-ESO Flux-Limited X-ray Galaxy Cluster Survey (REFLEX II) - III. Construction of the first flux-limited supercluster sample '

Aufgrund der Abnahme der Galaxienhaufen bei einer höheren Rotverschiebung muss für die Linking Length die jeweilige Rotverschiebung angepasst werden. In Abbildung 2.1 ist die Linking Length für zwei verschiedene Herangehensweisen dargestellt.

Die treppenförmige Kurve kommt durch ein festgelegtes Intervall der betrachteten Rotverschiebung (z_{max} & z_{min}) zustande. In diesem Fall gilt: $\Delta z = z_{max} - z_{min} = 0.05$. Der Vorteil dieser Wahl ist, dass die Linking Length in diesem Bereich einheitlich festgelegt ist und für jeden Galaxienhaufen gleichermaßen verwendet werden kann. Dies erleichtert die Zusammenstellung der Superhaufen.

Andererseits variiert die Materiedichte bei kleinsten Änderungen der betrachteten Rotverschiebung. Daher sollte die Linking Length der jeweiligen Rotverschiebung angepasst werden, um exakte Ergebnisse zu erzielen. Die daraus resultierende Linking Length ist als kontinuierlicher Graph dargestellt. Aus Abbildung 2.1 lässt sich entnehmen, dass beide Methoden nicht immer den selben Wert reproduzieren. Im Bereich von z_{min} liefert Methode zwei einen geringeren Wert für l , bei z_{max} einen größeren Wert. Da die y-Achse hier logarithmisch angetragen ist, kann es somit schnell zu Abweichungen der Linkin Length um bis zu $10Mpc$ kommen. Die zweite Methode liefert somit bessere Ergebnisse für kontinuierliche Rotverschiebungen, da es schon bei kleinen Änderungen der Rotverschiebung zu einer Veränderung von l kommt. Würde man die Abweichungen von l vernachlässigen, so hätte dies Auswirkungen auf das Aussehen der gefundenen Superhaufen.

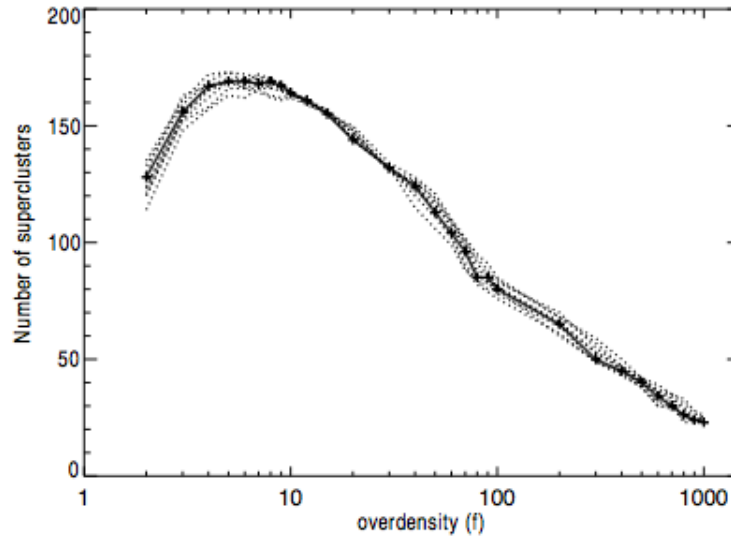


Abbildung 2.2.: Anzahl der Superhaufen als Funktion des Überdichteparameters f
 Credits: Chon et al. (2013) ' The extended ROSAT-ESO Flux-Limited X-ray Galaxy Cluster Survey (REFLEX II) - III. Construction of the first flux-limited supercluster sample '

Der Einfluss des jeweiligen Rotverschiebungsintervalls auf die Superhaufen ist in Abbildung 2.2 dargestellt. Jede Linie (durchgezogen oder gepunktet) steht für ein eigenes Rotverschiebungsintervall⁹ Δz . Für verschiedene Δz bleibt die Anzahl an Galaxienhaufen weitestgehend konstant. Daraus folgt, dass die Linking Length für verschiedene Rotverschiebungsintervalle bei einem festgelegten Überdichteparameter f weniger empfindlich ist, als bisher angenommen. Bei geringer Rotverschiebung und ebenso niedriger Überdichte bilden die Galaxienhaufen zusammen eine einzige riesige Struktur. Bei großen Überdichten nimmt die Anzahl an Superhaufen stark ab. Bei $f = 4$ bis $f = 10$ werden jedoch am meisten Superhaufen gefunden. Die Wahl des Überdichteparameters f ist somit enorm wichtig für das Aussehen der Superhaufen.

Um ein Verständnis dafür zu bekommen, weshalb die Wahl von f so wichtig ist, sollte man sich zuerst mit den verschiedenen Entwicklungsstadien für gebundene Strukturen auseinandersetzen.

- Die Struktur ist gravitativ gebunden¹⁰ und deren mittlere Dichte ist doppelt so groß wie die kritische Dichte¹¹ des Universums. Diese Struktur wird in der Zukunft kollabieren.

⁹ $\Delta z = 0.025; 0.01; 0.05; 0.1$

¹⁰Das Gravitationspotential ist größer als die Eigenbewegung bzw. kinetische Energie des Objektes

¹¹kritische Dichte des Universums: $\rho_{crit} = \frac{3H_0^2}{8\pi G} = 1,88 \cdot 10^{-29} \frac{h^2 g}{cm^3}$

- Der Hubble-Fluß der Struktur verlangsamt sich und die Struktur beginnt zu kollabieren. Die mittlere Dichte ist hier dreimal so groß im Vergleich zur kritischen Dichte des Universums.
- Zeit der Virialization: In dieser Zeit kollabiert eine homogene überdichte Struktur in eine Singularität. Dieser Zustand wird von Superhaufen nicht erreicht. Falls doch, dann werden sie per Definition große Galaxienhaufen.

Um Superhaufen klassifizieren zu können, ist es erforderlich, deren durchschnittliche Materieüberdichten zu kennen. Ebenso muss die kritische Dichte des Universums berücksichtigt werden. Die jeweiligen Überdichten sind relativ schwer bestimmbar, daher wird die Dichte des jeweiligen Galaxienhaufens mittels der Materiedichte bestimmt. Hier gilt es aber zu beachten, dass Galaxienhaufen keine gleichmäßig, homogene Dichteverteilung besitzen. Dies wird durch den Bias Faktor beschrieben. Dieser berücksichtigt die komplette Dichteverteilung und ist definiert als:

$$b_{CL} = \frac{\Delta_{CL,m}}{\Delta_{DM,m}} \quad (2.1.6)$$

mit:

$$\Delta_{X,m} = \frac{\rho_X - \rho_m}{\rho_m} \quad (2.1.7)$$

(2.1.7) beschreibt hierbei wie sich die jeweilige Überdichte zusammensetzt. Die Indizes stehen für Dunkle Materie bzw. Cluster/Galaxienhaufen und die kritische bzw. mittlere Dichte des Kosmos. Hier gilt:

- $\Delta_{DM,c}, \Delta_{DM,m}$: Materieüberdichten
- $\Delta_{CL,m}$: Überdichte eines Galaxienhaufens

Man hat sich dafür entschieden für die REFLEX II Superhaufen $f = 10$ zu verwenden. Dadurch ist es möglich, umfangreiche gebundene Strukturen zu finden und diese werden nicht komplett vollständig zerfallen.

Die prozentualen Anteile der unterschiedlichen Superhaufen¹² sind in Abbildung 2.3 als Funktion des Überdichteparameters f dargestellt. Die unterschiedlich gepunkteten Linien stehen für verschiedene Rotverschiebungsintervalle $\Delta z = 0.025; 0.01; 0.05; 0.1$. In der Graphik sind die Linien auf drei verschiedene Weisen dargestellt. Die Gruppe am oberen Rand steht für Superhaufen, bestehend aus genau zwei Galaxienhaufen. Die Linien in der Mitte für Superhaufen, die aus drei Galaxienhaufen aufgebaut sind. Der untere Bereich wird durch die restlichen, größeren Superhaufen gebildet. Die Abbildung macht deutlich, dass die komplette Verteilung von Paarsuperhaufen dominiert wird. Später im 4. Kapitel wird noch die Zahl der gefundenen Superhaufen innerhalb der Magneticum Boxen untersucht und sehr ähnliche Resultate erzielt.

¹²Anzahl der Mitglieder eines Superhaufens

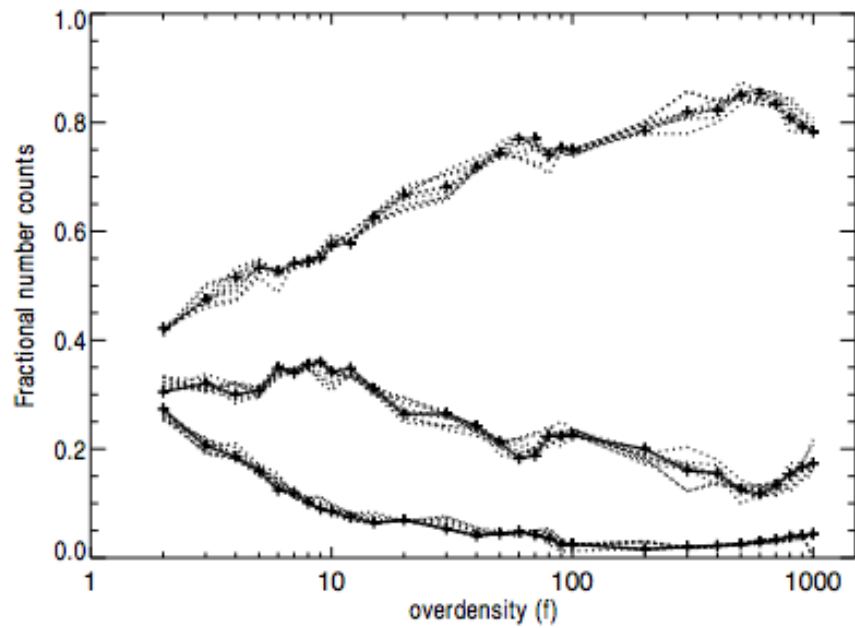


Abbildung 2.3.: Überdichteparameter f als Funktion der Rotverschiebung der Galaxienhaufen
Credits: Chon et al. (2013) ' The extended ROSAT-ESO Flux-Limited X-ray Galaxy Cluster Survey (REFLEX II) - III. Construction of the first flux-limited supercluster sample '

Bei einer geringeren Überdichte f werden aufgrund der größer werdenden Linking Length größere Superhaufen gebildet. Wird hingegen der Überdichteparameter größer gewählt, so findet man einen höheren Anteil an Paarsuperhaufen, denn hier werden nur die dichtesten Regionen verwendet. Des weiteren hat die Kurve für Superhaufen, bestehend aus drei Galaxienhaufen, ihr Maximum bei $f = 10$. [2]

2.2. Vergleich zwischen verschiedenen Katalogen

Wie bereits in der Einleitung erwähnt, basieren die ersten Superhaufen-Kataloge rein auf optischen Beobachtungen. Daher sind diese nicht mit dem REFLEX II Superhaufenkatalog vergleichbar, da dieser ein vollkommen anderes Auswahlkriterium verwendet. Die ersten Kataloge, ausgenommen dem EETMA¹³, setzen sich durch die von Abell gefundenen Galaxienhaufen zusammen. Des Weiteren werden hier noch kleinere Modelle als heutzutage verwendet und der Großteil der Abell Galaxienhaufen weist keine Rotverschiebung auf. Dennoch werden die Superhaufen aus den früheren Katalogen mit einem ähnlichen Kriterium im Vergleich zum Friends-of-Friends Algorithmus bestimmt. Abell bestimmte seine Superhaufen durch Zählen der Galaxienhaufen in verschiedenen Gebieten für bestimmte Entfernungen.

Die Linking Length ist in fünf Katalogen von der jeweiligen Überdichte abhängig. Diese Kataloge werden allerdings für verschiedene Überdichten kompiliert. Abschließend lässt sich sagen, dass eine große Zahl an Superhaufen in verschiedensten Katalogen vorkommen, obwohl diese mit unterschiedlichsten Kriterien bestimmt wurden. Somit muss es sich bei diesen Strukturen um auffallende und prominente handeln. [2]

¹³EETMA ist ein Superhaufenkatalog

3. REFLEX II Superhaufen Katalog

Der folgende Abschnitt erklärt die Grundsätze des REFLEX II Superhaufen Katalogs, sowie die verschiedenen Methoden zur Untersuchung der erhaltenen Resultate. Das Folgende basiert auf Chon et al. (2013) 'The extended ROSAT-ESO Flux-Limited X-ray Galaxy Cluster Survey (REFLEX II) - III. Construction of the first flux-limited supercluster sample'

3.1. Allgemeines

Bei dem Reflex II Superhaufen Katalog handelt es sich um den ersten Katalog, der mittels der erweiterten ROSAT-ESO Flux Limited X-ray Galaxy Cluster Beobachtung (abgekürzt REFLEX II) erstellt wurde. Bei der REFLEX II Beobachtung werden 919 Galaxienhaufen gefunden. Diese haben eine Flussgrenze von $1,8 \cdot 10^{-12} \text{erg s}^{-1} \text{cm}^{-2}$. Des weiteren wird die Zahl der Galaxienhaufen durch eine Begrenzung der Leuchtkraft limitiert. Alle Galaxienhaufen oberhalb einer Leuchtkraft von $L_X \geq 5 \cdot 10^{43} \text{ erg/s}$ werden berücksichtigt. Verschiebt man die Begrenzung der Leuchtkraft¹⁴ weiter nach oben, so werden die Strukturen nur von den am stärksten leuchtenden Objekten gebildet. Die Wahl von Superhaufen ist aber weitgehend unabhängig von der Leuchtkraft der Galaxienhaufen.

Basierend auf dem Galaxienhaufen-Katalog wird ein Superhaufen-Katalog ausgearbeitet. Mittels dem Friends-of-Friends Algorithmus, definiert über die Linking Length, beruhend auf der jeweiligen Galaxienhaufendichte¹⁵, können die Superhaufen gefunden werden. Der resultierende Katalog beinhaltet 164 Superhaufen bei einer Rotverschiebung von $z \leq 0,4$. Wie bereits in Kapitel 2 erläutert, bestimmt die Wahl der Linking Length die Eigenschaften der Superhaufen. Für den REFLEX Superhaufen Katalog wird als Überdichteparameter $f = 10$ verwendet. Hierfür werden 895 REFLEX II Galaxienhaufen verwendet, wobei 486 direkt in Superhaufen zu finden sind.

Mit den gefundenen Ergebnissen ist es möglich, die Ausdehnung und die Multiplizität der Superhaufen zu untersuchen. Im Folgenden werden beide Begriffe anhand von Beobachtungen erläutert, ehe sie in Kapitel 4 auf die eigenen Ergebnisse angewendet werden.

¹⁴Durch die Leuchtkraft können Rückschlüsse auf die jeweilige Masse des Objektes gezogen werden und somit ein Limit für die Mindestmasse des Objektes aufgestellt werden

¹⁵varierend mit der Rotveschiebung

3.2. Eigenschaften von Superhaufen

Multiplizitätsfunktion Die Multiplizitätsfunktion beschreibt die Anzahl von Galaxienhaufen innerhalb eines Superhaufens. Superhaufen sind Systeme, die mindestens zwei Galaxienhaufen beinhalten. Nun ist es interessant, ob noch größere Strukturen als Paarsuperhaufen gefunden werden können. Die Multiplizitätsfunktion ist von der Linking Length abhängig, denn diese bestimmt das Aussehen / die Anzahl an Mitglieder der Superhaufen. Wie bereits in Kapitel 2 erläutert ist die Linking Length direkt von dem jeweiligen Überdichteparameter abhängig. In Abbildung 3.1 ist die Multiplizitätsfunktion für verschiedene Überdichteparameter aufgetragen. Wählt man für die Linking Length einen großen Wert, so führt dies nach Gleichung (2.1.1) zu einem kleineren Überdichteparameter f . Daher ergibt sich eine breitere Verteilung für die Multiplizitätsfunktion, da eine große Linking Length viele einzelne Galaxienhaufen, die zum Teil gar nicht gravitativ untereinander gebunden sind, zu einem Superhaufen zusammensetzt. Somit ergeben sich riesige Strukturen, die zum Teil mehr als 20 Mitglieder haben. Dies ist in Abbildung 3.1 links oben gut erkennbar. Wird nun die Linking Length verringert, so vergrößert sich der Überdichteparameter f . In den anderen drei Graphiken wird nun f immer weiter erhöht, was zu einer schmaleren Verteilung der Multiplizitätsfunktion führt. Daraus kann man schließen, dass durch einen hohen Überdichteparameter nur die dichtesten Regionen verwendet werden. Dies führt zu einer Abnahme der Anzahl der Mitglieder/ an Galaxienhaufen innerhalb eines Superhaufens. Generell betrachtet wird die Verteilung von Paarsuperhaufen dominiert, während die Zahl an Galaxienhaufen mit steigender Mitgliederzahl immer weiter abnimmt.

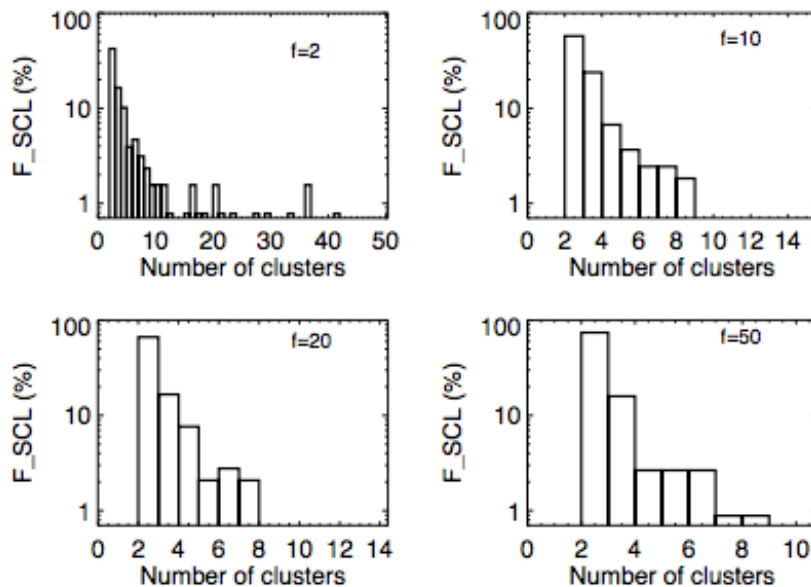


Abbildung 3.1.: Multiplizitätsfunktion als Funktion der Anzahl der Mitglieder eines Superhaufens

Credits: Chon et al. (2013) ' The extended ROSAT-ESO Flux-Limited X-ray Galaxy Cluster Survey (REFLEX II) - III. Construction of the first flux-limited supercluster sample '

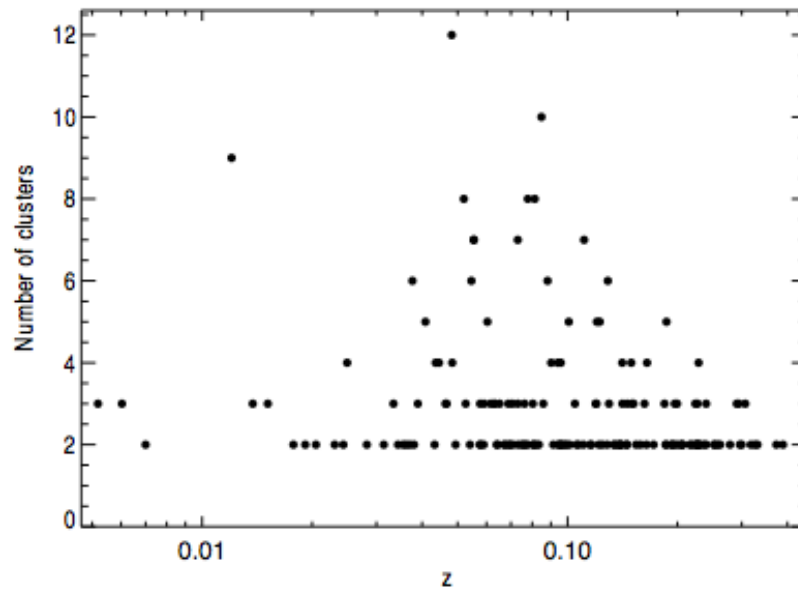


Abbildung 3.2.: Multiplizitätsfunktion als Funktion der Anzahl der Mitglieder eines Superhaufens

Credits: Chon et al. (2013) ' The extended ROSAT-ESO Flux-Limited X-ray Galaxy Cluster Survey (REFLEX II) - III. Construction of the first flux-limited supercluster sample '

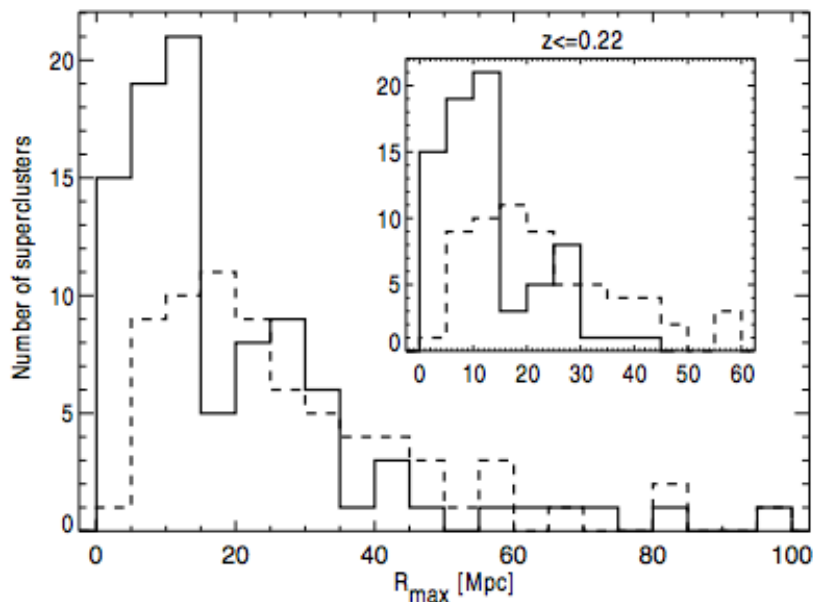


Abbildung 3.3.: Anzahl der Superhaufen als Funktion deren Ausdehnung

Credits: Chon et al. (2013) ' The extended ROSAT-ESO Flux-Limited X-ray Galaxy Cluster Survey (REFLEX II) - III. Construction of the first flux-limited supercluster sample '

Die Multiplizitätsfunktion kann des weiteren als Funktion der Rotverschiebung dargestellt werden. Hierfür wird $f = 10$ verwendet. Auch hier dominieren die Paarsuperhaufen die Verteilung, da diese in jeden Rotverschiebungsbereich auftreten, während größere Strukturen nur unterhalb einer Rotverschiebung von $z \leq 0.1$ zu finden sind. Überhalb einer Rotverschiebung von $z > 0.2$ werden keine Superhaufen mit mehr als fünf Mitgliedern gefunden.

Extend / Ausdehnung der Superhaufen Superhaufen sind die größten Strukturen in unserem Universum. Um festzustellen wie groß diese Strukturen sind, definiert man die Ausdehnung von Superhaufen als den Abstand zwischen dem Massenzentrum des Superhaufens und dem am weitesten entfernten Galaxienhaufen. In Abbildung 3.3 sind die Ergebnisse der ROSETA-Beobachtung dargestellt. Es handelt sich um ein Histogramm, welches die Anzahl an Superhaufen innerhalb eines bestimmten Bereichs der Ausdehnung angibt. In diesem Fall wird nach den Superhaufen innerhalb eines $5Mpc$ -Bereichs gesucht. Des weiteren wird zwischen Paarsuperhaufen (durchgezogene Linie) und größeren Superhaufen (gestrichelte Linie) unterschieden. Die Verteilung für Paarsuperhaufen hat ihr Maximum im Bereich einer Ausdehnung von etwa $10Mpc$ und erstreckt sich bis zu einer maximalen Ausdehnung von $100Mpc$. Generell betrachtet, wird die komplette Verteilung von Paarsuperhaufen dominiert.

In Abbildung 3.3 oben rechts ist ein weiterer Graph eingezeichnet. Dieser beschränkt sich auf Objekte unterhalb von $z \leq 0.22$. Die Verteilung zeigt dasselbe Verhalten, da erneut die Paarsuperhaufen die Verteilung dominieren. Dieses Verhalten wird in Kapitel 4 untersucht und überprüft.

4. Zusammensetzung von Superhaufen unter physikalischen Bedingungen

Im folgenden Abschnitt wird eine weitere Methode zur Zusammenstellung von Superhaufen vorgestellt. Deren Ergebnisse werden im Anschluss mit den Ergebnissen der REFLEX II Beobachtungen verglichen.

4.1. Grundlagen

Superhaufen können mittels verschiedenster Kriterien zusammengestellt werden (siehe Kapitel 2). Dabei handelt es sich aber nicht um den einzigen Weg, denn es existiert eine weitere Methode. Superhaufen bestehen aus gravitativ untereinander gebundener Galaxienhaufen. Will man nun einen Superhaufen zusammensetzen, betrachtet man ein Massenzentrum (wahlweise der schwerste Galaxienhaufen aus den Daten) und findet heraus, welche anderen Galaxienhaufen an dieses Zentrum gebunden sind. Hierbei müssen mehrere Terme berücksichtigt werden. Diese sind das Gravitationspotential, die Eigenbewegung der Galaxienhaufen und die Hubble-Expansion des Universums. Die verwendeten Daten stammen von Magenticum aus den Boxen 0 und 2b. Box 0 erstreckt sich über ein Volumen von $(2688 Mpc/h)^3$ und beinhaltet $2 \cdot 4536^3$ Halos. Box 2b ist im Vergleich etwas kleiner, denn Box 2b beinhaltet $2 \cdot 2880^3$ Teilchen, deren Massen zwischen $10^{12} - 10^{15} M_{\odot} h^{-1}$ variieren und sich über ein Volumen von $(640,0 Mpc/h)^3$ erstrecken. Es wird der Ausschnitt bei einer Rotverschiebung von $z = 0,293$ betrachtet. Nun folgt der theoretische Teil, indem die einzelnen Terme erläutert werden.

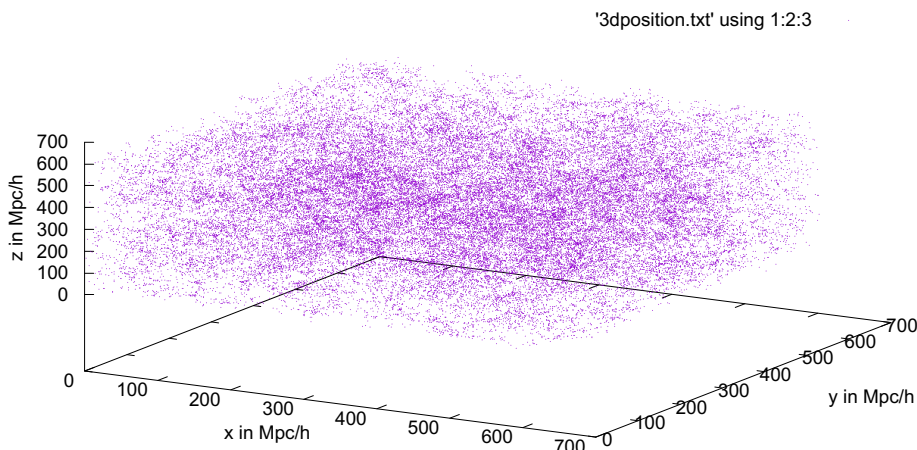


Abbildung 4.1.: Dreidimensionale Darstellung aller Halos innerhalb von Box 2b

Abbildung 4.1 ist eine dreidimensionale Darstellung der Magneticum Box 2b. Hier ist jedes einzelne Halo durch einen Punkt dargestellt. Es handelt sich hierbei um fast 50.000 Objekte, die an ihrer jeweiligen Position im Raum zu finden sind. Bei den hier verwendeten Objekten handelt es sich um Galaxienhaufen, einzelne Galaxien oder Gruppen.

4.1.1. Newtonsches Gravitationsgesetz

Superhaufen bestehen aus mindestens zwei gravitativ aneinander gebundener Galaxienhaufen. Um festzustellen, ob diese wirklich gebunden sind, müssen die zwischen ihnen wirkenden Kräfte betrachtet werden. Die Kraft, die zwischen verschiedenen Massen wirkt, wird durch das Newtonsche Gravitationsgesetz beschrieben und ist gegeben durch:

$$F(\vec{r}) = -G \cdot \frac{m \cdot M}{r^2} \cdot \hat{r} \quad (4.1.1)$$

- Gravitationskonstante: $G = 6,67 \cdot 10^{-11} \frac{\text{N} \cdot \text{m}^2}{\text{kg}^2}$
- M : Masse des schwereren Körpers
- m : Masse des leichteren Körpers
- r : Abstand zwischen den Massenpunkten
- \hat{r} : Einheitsvektor

Diese Kraft wirkt zwischen verschiedenen Massen und ist auf großen Skalen gut messbar.

Nun wird in der folgenden Berechnung nicht die Gravitationskraft, sondern das Potential U benötigt. Das Gravitationspotential ist eine Energie, die angibt wie stark ein Galaxienhaufen an die zentrale Masse gebunden ist, welches daher mit einer Bindungsenergie vergleichbar ist. Ein Galaxienhaufen muss eine höhere Energie als die Bindungsenergie besitzen, um sich dem Einfluss der zentralen Masse entziehen zu können.

Dieses berechnet sich wie folgt:

$$U(r) = - \int F(r) dr = - \int \left(- \frac{G \cdot M \cdot m}{r^2} \right) dr = - \frac{G \cdot M \cdot m}{r} \quad (4.1.2)$$

Hier wird angenommen, dass man sich entlang des Einheitsvektors bewegt. Deshalb kann dieser weggelassen werden.

In der folgenden Berechnung bestimmt man das Gravitationspotential zwischen der zentralen Masse (hier der schwersten Galaxienhaufen) mit Masse M und den leichteren Galaxienhaufen der Masse m im jeweiligen Abstand r . Ein Galaxienhaufen ist an die zentrale Masse gebunden, falls seine Eigenenergie geringer als das Gravitationspotential ist. $U(r)$ ist indirekt proportional zum Abstand des jeweiligen Galaxienhaufens. Daher nimmt die Bindungsenergie mit steigendem Abstand ab. In diesem Falle sind Galaxienhaufen mit einem größeren r schwächer an die zentrale Masse gebunden und somit anfälliger für Störungen des Systems.[5]

4.1.2. Eigenbewegung und Hubble-Expansion

Neben dem Einfluss durch die Gravitationskraft muss die Eigenbewegung des jeweiligen Galaxienhaufen berücksichtigt werden. Die Eigenbewegung kann direkt durch die Bestimmung der kinetischen Energie des Galaxienhaufens berechnet werden. Hierfür gilt:

$$E_{\text{kin}} = \frac{1}{2} \cdot m \cdot \vec{v}^2 = \frac{1}{2} \cdot m \cdot (v_x^2 + v_y^2 + v_z^2) \quad (4.1.3)$$

- m : Masse des jeweiligen Galaxienhaufens
- v_i : Geschwindigkeitskomponente in 3D ($i = x, y, z$)

E_{kin} kann somit für jeden einzelnen Galaxienhaufen direkt berechnet werden. Es ist aber nicht ausreichend nur die Geschwindigkeit des betrachteten Galaxienhaufens einzusetzen, denn die zentrale Masse bewegt sich ebenso durch den Raum. Deshalb muss hier die Relativgeschwindigkeit betrachtet werden.

$$\vec{v} = \vec{v}_{\text{Zentrum}} - \vec{v}_{\text{Galaxienhaufen}} \quad (4.1.4)$$

Neben der Eigenbewegung der Galaxienhaufen muss ebenso die Expansion des Universums berücksichtigt werden. Diese liefert einen zusätzlichen Geschwindigkeitsanteil, mit dem sich der Galaxienhaufen vom Massenzentrum entfernt.

Im Jahre 1929 veröffentlicht Edwin Hubble¹⁶ das von ihm formulierte Hubble-Gesetz.

$$v = H_0 \cdot d \quad (4.1.5)$$

Hubble erkannte, dass zwischen dem Abstand d und der jeweiligen Geschwindigkeit v einer Galaxie ein Zusammenhang besteht. Galaxien, die weiter von uns entfernt sind, bewegen sich mit einer größeren Geschwindigkeit von uns weg als näher gelegene Galaxien. Die Expansion des Universums wird durch die Hubble-Konstante beschrieben:

$$H_0 = 67,74 \frac{\text{km}}{\text{s} \cdot \text{Mpc}}$$

Da wir uns im dreidimensionalen Raum befinden, folgt für den Korrekturterm:

$$\vec{v}_{\text{Korrektur}} = \begin{pmatrix} v_1 \\ v_2 \\ v_3 \end{pmatrix} = H_0 \cdot \begin{pmatrix} d_1 \\ d_2 \\ d_3 \end{pmatrix} = H_0 \cdot \vec{d} \quad (4.1.6)$$

\vec{d} kann einfach bestimmt werden, da von beiden Galaxienhaufen die jeweiligen Positionen und somit die Ortsvektoren bekannt sind ($\vec{d} = \vec{b} - \vec{a}$). Unter Verwendung der Gleichungen (4.1.3) - (4.1.6) erhält man den finalen Term für die kinetische Energie.

$$E_{\text{kin}} = \frac{1}{2} \cdot m \cdot \left[\begin{pmatrix} v_1 \\ v_2 \\ v_3 \end{pmatrix} + H_0 \cdot \begin{pmatrix} d_1 \\ d_2 \\ d_3 \end{pmatrix} \right]^2 \quad (4.1.7)$$

Nun ist es möglich die jeweiligen Energien zu vergleichen und festzustellen, welche Galaxienhaufen an andere gebunden sind.

¹⁶Amerikanischer Astronom (1889-1953)

4.2. Theoretisches Prinzip und Berechnung

Um Superhaufen zusammenzustellen müssen laut Definition in Kapitel 1 mehrere Galaxienhaufen aneinander gebunden sein. Ein Galaxienhaufen ist ungebunden, falls seine eigene Energie größer als das Gravitationspotential ist. Es gilt: $U > E_{kin}$.

Somit kann sich der Galaxienhaufen dem Einfluss der zentralen Masse entziehen, da er sich mit einer ausreichend hohen Geschwindigkeit bewegt, die größer oder gleich der Fluchtgeschwindigkeit ist. Ist jedoch der Potentialterm größer als die Eigenbewegung und die Hubble-Expansion, so ist der Galaxienhaufen an die zentrale Masse gebunden. Es gilt: $U < E_{kin}$. Seine Geschwindigkeit ist geringer als die erforderliche Fluchtgeschwindigkeit, um sich dem Einfluss der zentralen Masse zu entziehen.

Um einen Superhaufen zusammenzustellen, wählt man den schwersten Galaxienhaufen als zentrale Masse und bestimmt für alle anderen Galaxienhaufen der Potentialterm und den jeweiligen kinetischen Anteil bestehend aus der Eigenbewegung und der Hubble-Expansion des Universums. Die Resultate sind für ein Beispiel in Abbildung 4.2 geplotet.

4.3. Resultate für Box 2b

Der folgende Abschnitt wird die Ergebnisse der Berechnung für die Box 2b wiedergeben. Hierfür werden alle Objekte als Galaxienhaufen betrachtet, obwohl einige Objekte innerhalb der Box eigentlich zu leicht sind, um ein Galaxienhaufen zu sein. Dies wird im nächsten Abschnitt berücksichtigt, um die Resultate mit den REFLEX II Beobachtungen zu vergleichen. Dafür wird ein Massenlimit eingeführt, um diejenigen Objekte herauszufiltern, welche dieses nicht erfüllen, sodass es sich bei den verwendeten Objekten rein um Galaxienhaufen handelt.

Um den ersten Superhaufen innerhalb von Box 2b zu bestimmen, wird der Galaxienhaufen mit der größten Masse als zentrale Masse gewählt und die jeweiligen Energieterme für alle anderen Objekte in der Box berechnet. Das Resultat ist in Abbildung 4.2 dargestellt. Jeder Galaxienhaufen ist durch einen Punkt in lila für den Potentialterm und einen in türkis für den kinetischen Term dargestellt.

Es werden beide Achsen logarithmisch zur Basis 10 geplotet, um die Ergebnisse anschaulicher darstellen zu können. Des Weiteren wird über beide Terme ein linearer Fit durchgeführt. Aus dem Schnittpunkt beider Geraden lässt sich die mittlere Ausdehnung des Superhaufens bestimmen. Bei diesem Schnittpunkt handelt es sich allerdings nur um einen Richtwert der Ausdehnung des Superhaufens, denn es existieren sowohl oberhalb, als auch unterhalb des Schnittpunktes Galaxienhaufen die gebunden oder nicht gebunden sind. Generell gilt: Ist der Potentialterm größer als der kinetische Anteil, so ist der Galaxienhaufen an die zentrale Masse gebunden.

Nun kann die Berechnung für die ganze Box durchgeführt werden. Man startet mit dem schwersten Galaxienhaufen als zentrale Masse und sucht nach anderen gebundenen Galaxienhaufen. Die dabei bereits verwendeten Galaxienhaufen sind für die weitere Rechnung nicht mehr relevant und werden daher bei der Zusammenstellung des nächsten Superhaufens nicht mehr berücksichtigt. Nun wird von den noch nicht verwendeten Galaxienhaufen

4.3. Resultate für Box 2b

fen erneut der schwerste als Massenzentrum verwendet und die Rechnung erneut durchgeführt. Die Berechnung endet, wenn alle Galaxienhaufen verwendet wurden.

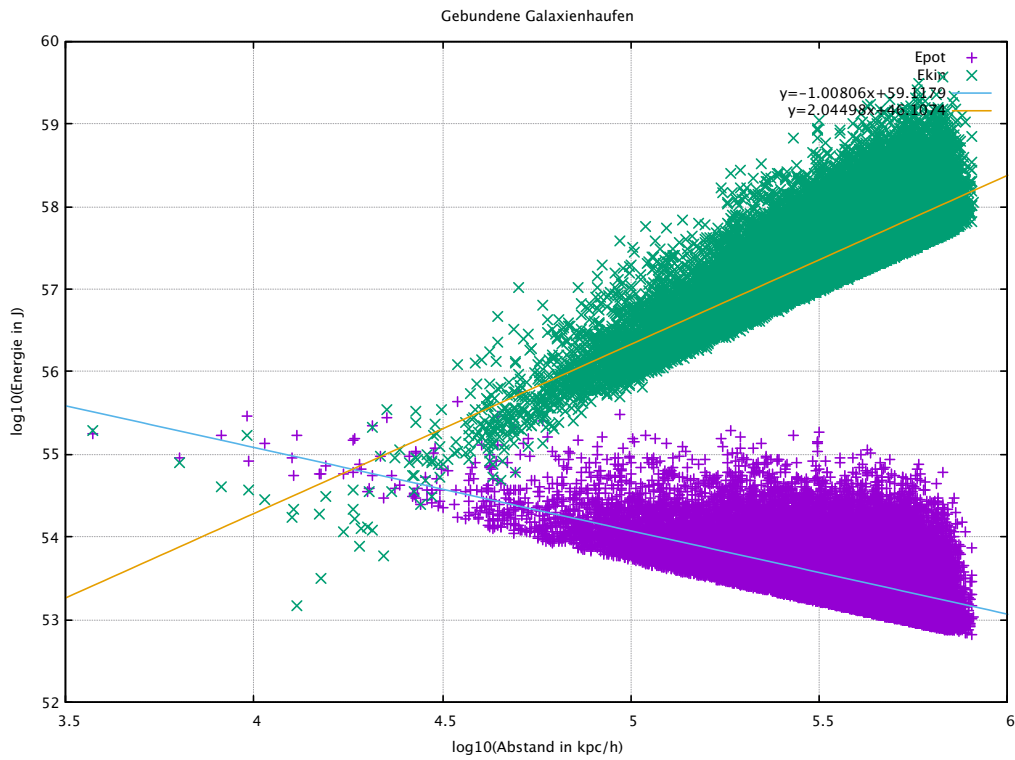


Abbildung 4.2.: Kinetische und potentielle Energie als Funktion des Abstandes für einen einzelnen Superhaufen

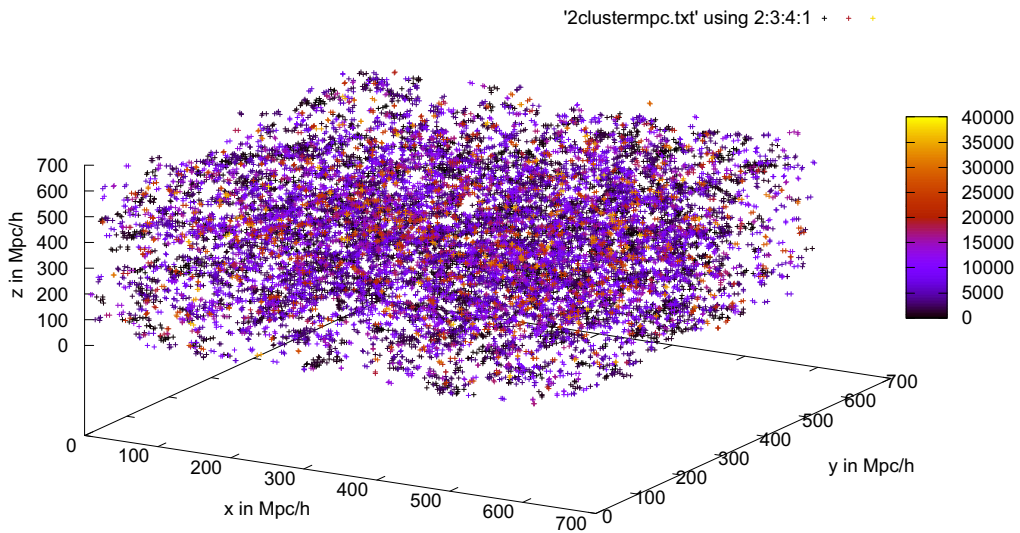


Abbildung 4.3.: Lage der Superhaufen innerhalb Box 2b, bestehend aus mindestens zwei Galaxienhaufen

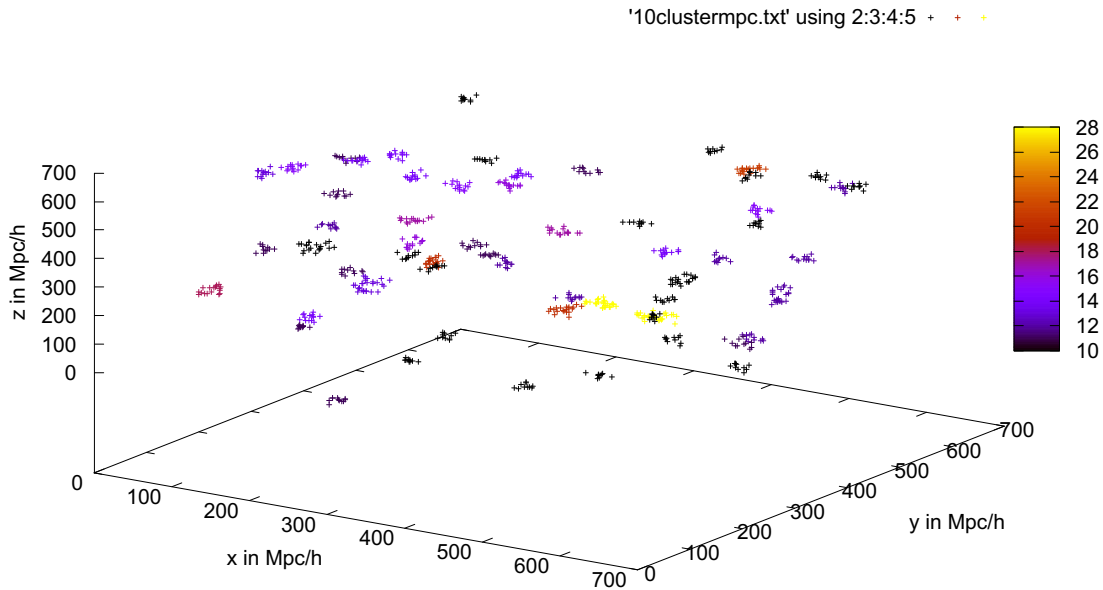


Abbildung 4.4.: Lage der Superhaufen innerhalb Box 2b, bestehend aus mindestens zehn Galaxienhaufen

Das Resultat der Rechnung sind mehrere tausend Superhaufen, die in Abbildung 4.3 dargestellt sind. Jeder Galaxienhaufen ist durch ein farbiges Kreuz dargestellt, entsprechend sind Galaxienhaufen die zum selben Superhaufen gehören in der selben Farbe dargestellt. Dabei wurden unterschiedliche Farben verwendet, denn jedem Superhaufen wird eine eigene ID und Farbe zugewiesen. Es wird bei ID 0 mit der größten Zentralmasse begonnen und diese nimmt mit steigender ID immer weiter ab. Hier ist zu beachten, dass für jede neu verwendete Zentralmasse eine neue ID vergeben wurde. Da aber nicht jede zentrale Masse gebundene Galaxienhaufen besitzt, sind hier nicht insgesamt 40.000 Superhaufen eingezeichnet, lediglich die ID geht bis zu 40.000. Leider sind die gefundenen Strukturen aufgrund der hohen Anzahl sehr schlecht zu erkennen.

Um einen besseren Überblick über die gefundenen Superhaufen zu haben, beschränkt sich Abbildung 4.4 rein auf Superhaufen, die aus mindestens zehn oder mehr Galaxienhaufen bestehen. Dadurch sind die großen Strukturen in dieser Darstellung deutlich besser zu erkennen. Die Art der Darstellung ist analog zu Abbildung 4.3, nur die Farbpalette am rechten Rand steht nun nicht mehr für die dem Superhaufen zugewiesene ID, sondern für die Anzahl an Mitgliedern eines Superhaufens. Somit sind Superhaufen, bestehend aus der selben Anzahl an Galaxienhaufen, in der selben Farbe dargestellt. Bereits in dieser Abbildung stellt sich heraus, dass die Zahl an Superhaufen bei einer höheren Mitgliederzahl abnimmt.

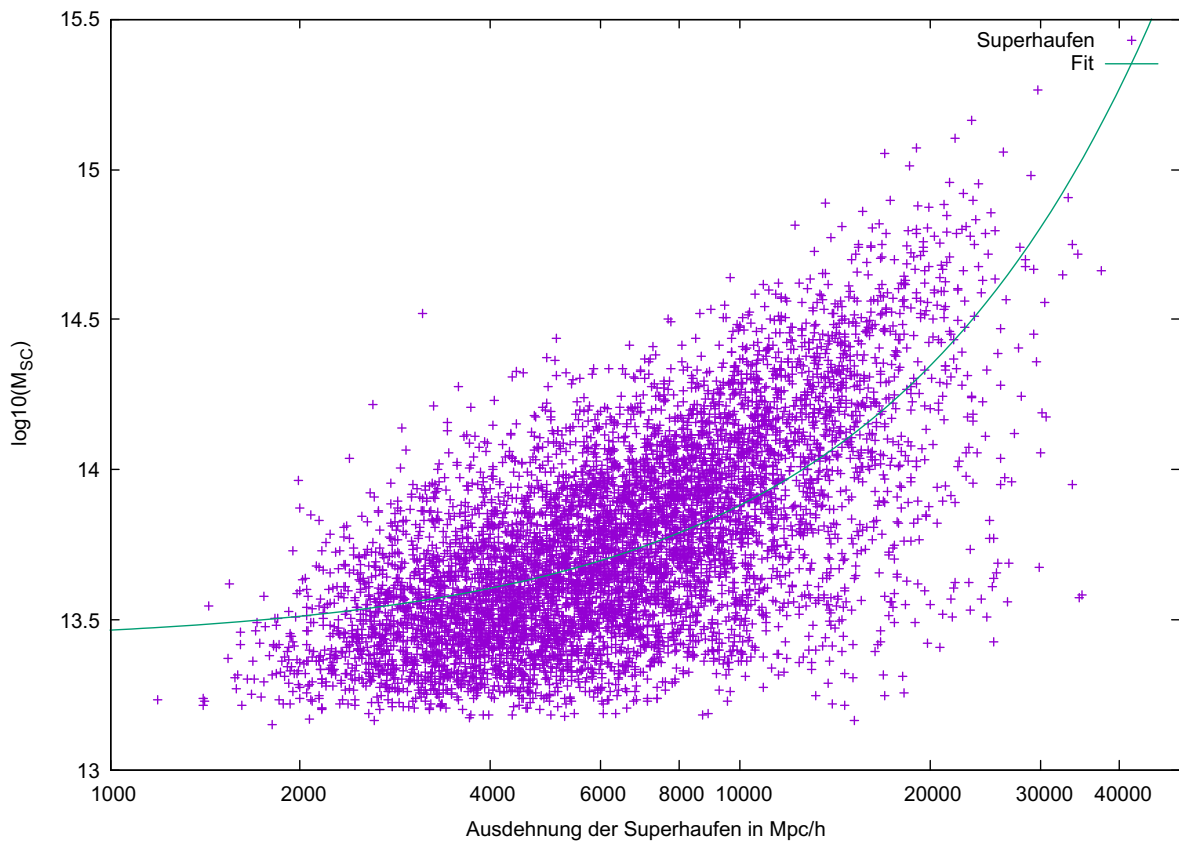


Abbildung 4.5.: Gesamtmasse der Superhaufen innerhalb Box 2b gegenüber deren Ausdehnung

Betrachtet man die Ausdehnung der Superhaufen im Vergleich zu deren Gesamtmasse, so ergibt sich eine direkte Proportionalität zwischen beiden Größen. Das Resultat ist in Abbildung 4.5 dargestellt. Dafür ist es erforderlich, die jeweiligen Massen der Mitglieder eines Superhaufens zusammen zu addieren und deren Ausdehnung zu kennen. Um die Ausdehnung zu erhalten, sucht man nach dem am weitesten vom Zentrum entfernten Galaxienhaufen. Durch den Abstand zwischen dem Zentrum und dem am weitesten entfernten Galaxienhaufen kennt man nun die Ausdehnung des jeweiligen Superhaufens. Betrachtet man das Ergebnis, so lässt sich mittels eines Fits eine Tendenz feststellen. In der Regel besitzen Superhaufen mit einer größeren Ausdehnung auch eine höhere Gesamtmasse. Dies gilt aber durch die enorm große Menge an Superhaufen nicht für alle gefundenen, sondern ist nur eine Prognose für das allgemeine Verhalten. Der durchgeführte Fit ist linear angesetzt. Es ergibt sich aber ein gekrümmter Graph, da die x-Achse logarithmisch skaliert ist.

Im Folgenden wird sowohl die Ausdehnung (Extend) als auch die Multiplizität der gefundenen Superhaufen analog zu Kapitel 3 der REFLEX II Beobachtung untersucht und graphisch dargestellt. Ein direkter Vergleich der jeweiligen Resultate folgt im nächsten Abschnitt.

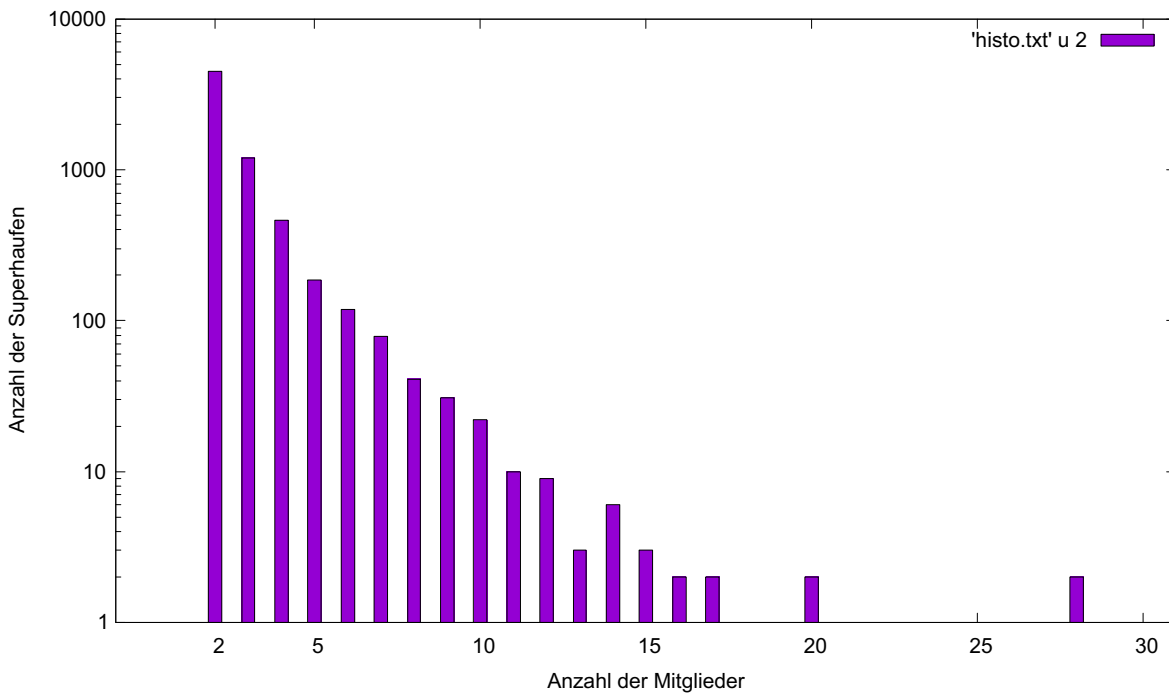


Abbildung 4.6.: Histogramm der Multiplizitätsfunktion für Box 2b

Wie bereits in Kapitel 3 erläutert, beschreibt die Multiplizitätsfunktion die Anzahl an Galaxienhaufen innerhalb eines Superhaufens. Das Resultat der gefundenen Superhaufen innerhalb von Box 2b ist in Abbildung 4.6 abgebildet. Hierfür werden alle Superhaufen entsprechend der Anzahl der Mitglieder, aus denen sie bestehen, verwendet und dargestellt. Da der Großteil der gefundenen Superhaufen aus zwei Mitgliedern besteht, wird die y-Achse logarithmisch skaliert, um einen besseren Überblick über den Rest der Verteilung zu haben. Aus dem Diagramm lässt sich entnehmen, dass die Anzahl an Superhaufen bei einer größer werdenden Mitgliederzahl abnimmt und immer weniger große Strukturen gefunden werden. Trotzdem existieren Strukturen mit bis zu 28 Mitgliedern.

Des weiteren wird nun noch die Ausdehnung der Superhaufen untersucht. Hierfür wird eine getrennte Betrachtung der Resultate durchgeführt. Es wird unterschieden zwischen Paarsuperhaufen und Superhaufen, bestehend aus mehr als zwei Mitgliedern. Die Abbildung 4.7 zeigt, dass Paarsuperhaufen meist eine geringere Ausdehnung besitzen und die einzelnen Mitglieder somit näher zusammen liegen. Dies macht die einzelnen Systeme / Strukturen stabiler und weniger empfindlich durch Fremdeinwirkungen. Dies kann auf den Theorieteil (siehe 4.1) zurückgeführt werden, denn ist die Distanz zwischen den einzelnen Objekten kleiner, so ergibt sich für das Gravitationspotential ein größerer Beitrag. Somit sind die Objekte stärker aneinander gebunden und kommen häufiger vor, da das ganze System stabiler ist. Größere Strukturen hingegen besitzen eine Ausdehnung, die bis zu $30 Mpc/h$ betragen kann. Allgemein betrachtet weisen diese eine größere Ausdehnung auf.

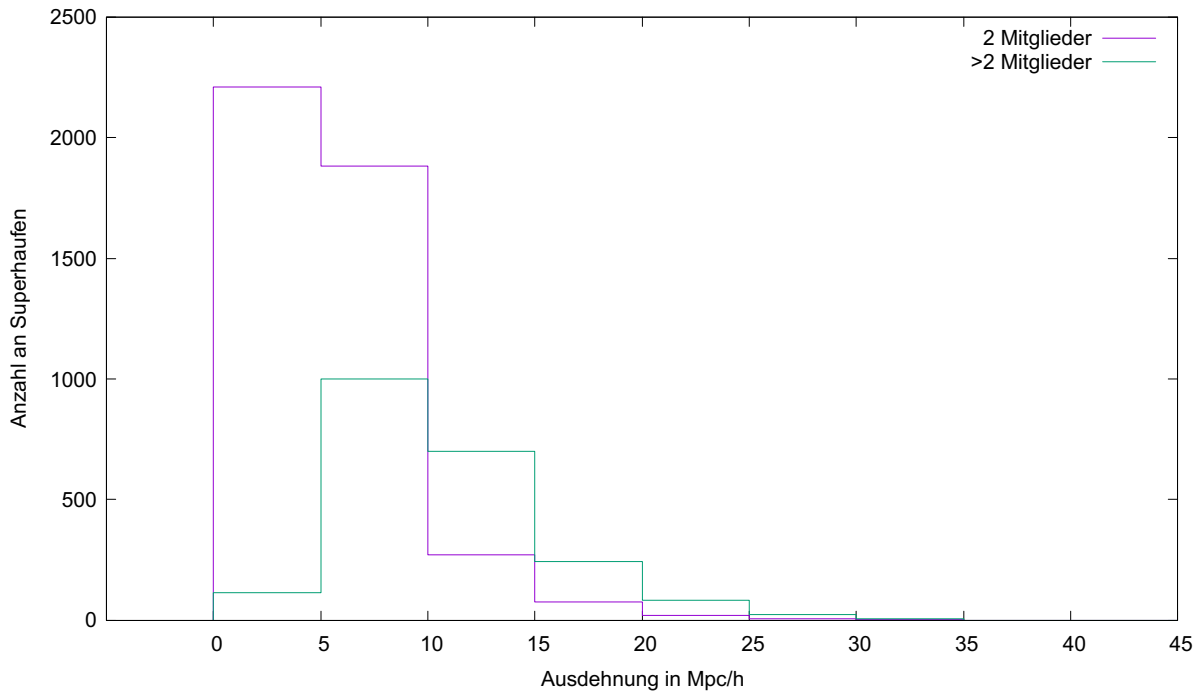


Abbildung 4.7.: Ausdehnung der Superhaufen in Box 2b

Abschließend zu diesem Unterkapitel folgt noch eine Dreidimensionale Darstellung eines der größten Superhaufen (28 Mitglieder) aus der Box 2b. Neben den jeweiligen Positionen der Objekte sind ebenso die jeweiligen Geschwindigkeitsvektoren der einzelnen Mitglieder eingezeichnet. Diese sind nicht im Maßstab zur Achsenskalierung, denn diese werden vergrößert, um sie besser erkennen zu können. Die Eigengeschwindigkeit der Objekte bewegt sich im Bereich von bis zu mehreren hundert km/s . Hierfür wird folgende Vergrößerung der Geschwindigkeiten¹⁷ vorgenommen:

$$v_{\text{neu}} = 0.5 \cdot \frac{v_{\theta}}{100} \cdot p \quad (4.3.1)$$

Für p gilt: $p = 3,24078 \cdot 10^{20} \cdot \frac{1}{0,6774}$

Somit werden die Einheiten der Geschwindigkeit durch p angepasst. Die beiden Vorfaktoren in Gleichung (4.3.1) sind sinnvolle Skalierungen, um die Vektoren in einer angemessenen Länge darzustellen. Hier wird bereits das im nächsten Unterkapitel eingeführte Massenlimit verwendet. Eine genaue Erläuterung folgt somit noch. Alle Objekte unterhalb der Mindestmasse¹⁸ sind in hellblau, alle anderen oberhalb in hellorange, dargestellt. Des weiteren sind die jeweiligen Geschwindigkeitsvektoren eingezeichnet. Im Plot lässt sich gut erkennen, dass sich die meisten Objekte auf das Zentrum hinbewegen. Das Zentrum ist derjenige Punkt, welcher nur einen Vektor besitzt. Hierfür existiert keine Hubble-Expansion.

¹⁷ v_{θ} sind hierbei die ursprünglichen Geschwindigkeitswerte

¹⁸ $M_{\text{min}} = 6,476 \cdot 10^{13} M_{\odot}/h$

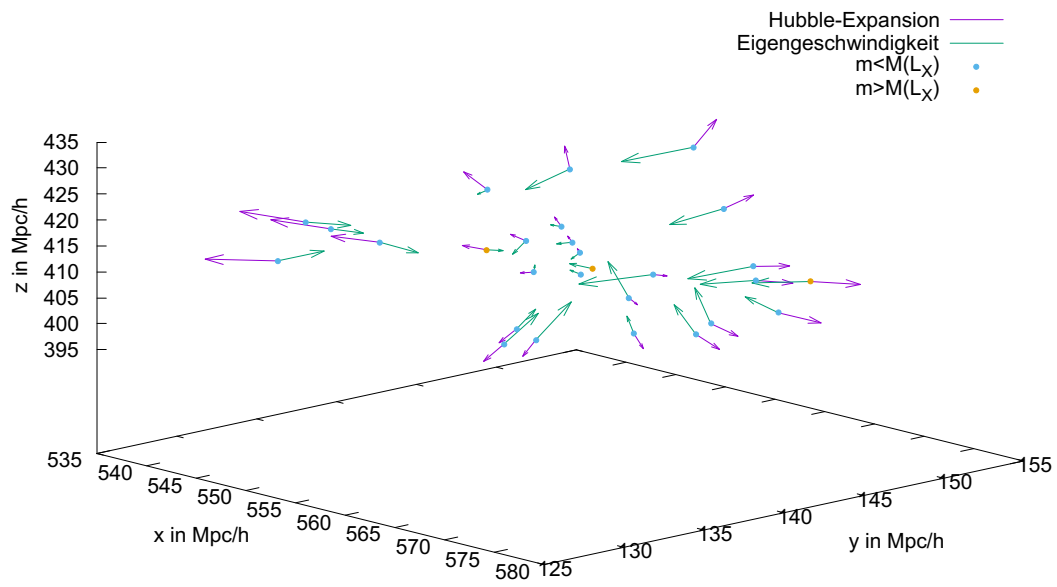


Abbildung 4.8.: Größter Superhaufen innerhalb Box 2b mit jeweiligen Geschwindigkeitsvektoren

4.4. Vergleich der Resultate aus Box 2b mit den REFLEX II Beobachtungen

Um die erhaltenen Ergebnisse mit den REFLEX II Beobachtungen vergleichen zu können, ist es erforderlich, aus den verwendeten Daten die jeweiligen Objekte herauszufiltern, welche eine Leuchtkraft von weniger als $L_X = 5 \cdot 10^{43} \text{ erg/s}$ besitzen. Der REFLEX II Superhaufen Katalog basiert auf diesem Kriterium. Da in den Daten keine Leuchtkraft angegeben ist, muss die Leuchtkraft in eine Masse umgerechnet werden.

$$M = 1,39 \cdot (L[10^{44} \text{ erg/s}])^{0,54} \cdot 10^{14} \cdot M_{\odot} \quad (4.4.1)$$

Führt man diese Rechnung durch, so ergibt sich für das untere Massenlimit:

$$M_{\min} = 6,476 \cdot 10^{13} M_{\odot}/h$$

Ebenso ist es aufgrund verschiedener Definitionen von Galaxienhaufen erforderlich, ein Massenlimit zu setzen. Wie in Kapitel 1 angegeben besitzen Galaxienhaufen eine Masse von etwa 10^{14} bis $10^{15} M_{\odot}$. Die einzelnen Objekte aus Box 2b beginnen bereits bei einer Masse von $10^{12} M_{\odot}/h$. Somit können die für den Plot verwendeten Daten eingeschränkt und nur diejenigen mit einer ausreichend großen Masse verwendet werden. Bei Objekten unterhalb dieses Limits kann es sich um kleine Galaxienhaufen, aber auch einzelnen Galaxien handeln.

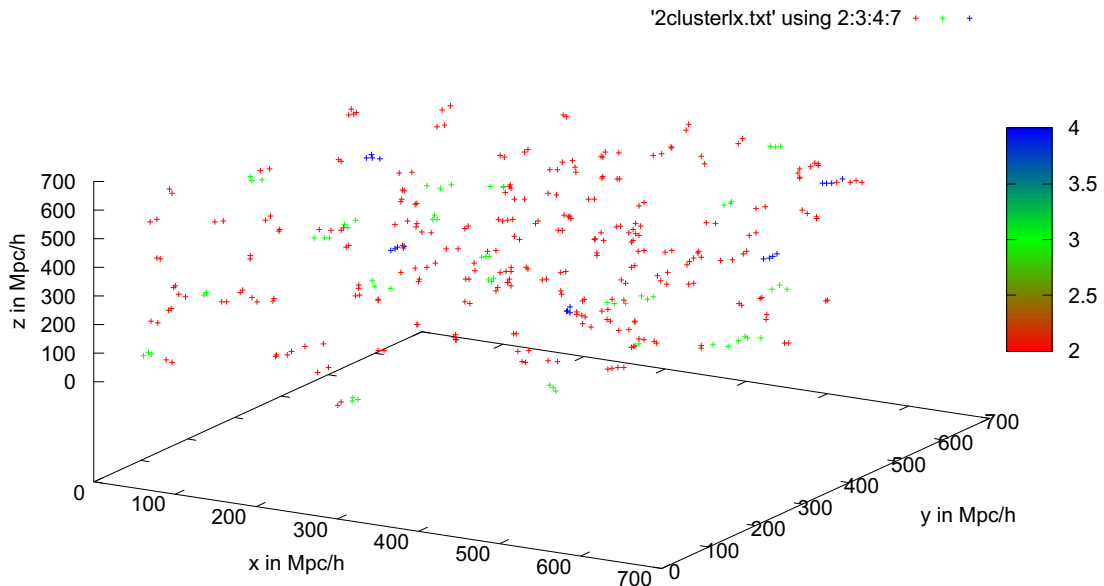


Abbildung 4.9.: Lage der Superhaufen innerhalb von Box 2b unter Berücksichtigung des Massenlimits

Die nun erhaltenen Ergebnisse sind in Abbildung 4.9 dargestellt, hierfür werden alle Ergebnisse geplottet. Das Massenlimit hat das Aussehen der Superhaufen entscheidend

verändert, denn somit wird die Zahl der verwendeten Objekte massiv eingeschränkt, da mittlerweile nur noch 2.000 anstatt von 50.000 Objekte verwendet werden. Die großen Strukturen mit bis zu 28 Mitgliedern sind verschwunden und man findet nun nur noch Superhaufen bestehend aus maximal vier Galaxienhaufen. Der größte Anteil der Superhaufen repräsentieren nach wie vor die Paarsuperhaufen.

Die Farbpalette an der rechten Seite steht nicht mehr für die ID des jeweiligen Superhaufens, sondern für die Anzahl an Galaxienhaufen aus denen ein Superhaufen besteht. Jedes einzelne Kreuz steht für einen Galaxienhaufen. Jeder rot eingefärbte Galaxienhaufen ist somit an einen weiteren gebunden, dargestellt durch zwei nahe nebeneinander liegende rote Kreuze. Es kann sein, dass manche Superhaufen schlecht erkennbar sind, da man keinen Ausschnitt findet, bei dem alle Superhaufen gut erkennbar sind.

Des weiteren kann man nun die gebildeten Strukturen aus den restlichen Objekten betrachten. Hier werden alle Halos mit einer Masse unterhalb der Mindestmasse verwendet.

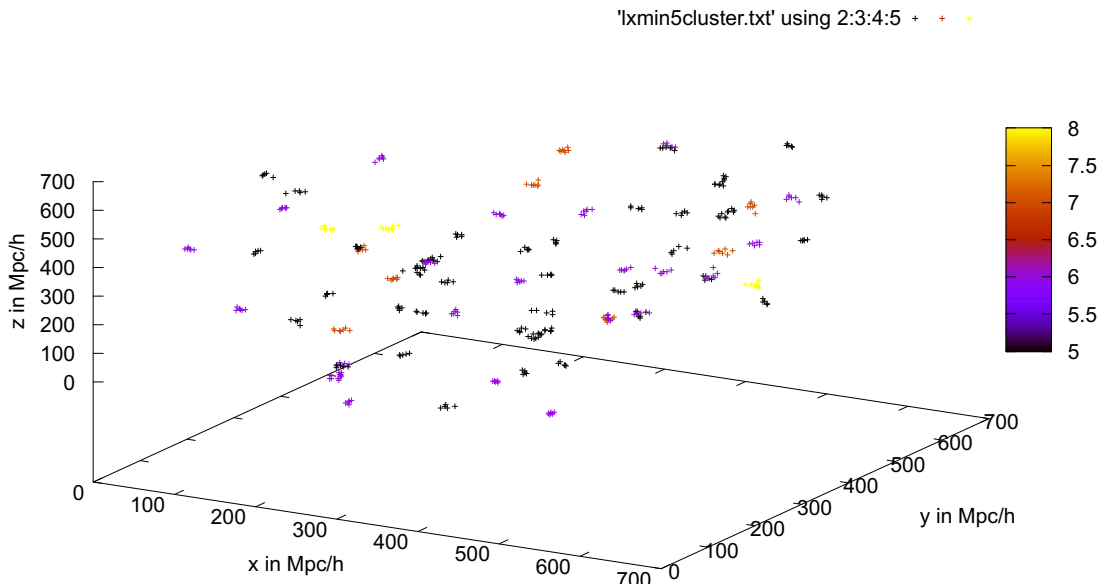


Abbildung 4.10.: Strukturverbände bestehend aus Halos innerhalb der Box 2b

Die dargestellten Strukturen sind in diesem Fall keine Superhaufen, da die verwendeten Objekte keine bzw. nur teilweise Galaxienhaufen sind. Wie oben beschrieben handelt es sich um Halos. Trotzdem werden aneinander gebundene Objekte gefunden, die große Strukturverbände bilden. Die Farbpalette inklusive Beschriftung gibt hier erneut die Anzahl von Mitgliedern der großen Strukturen an. Der Plot ist auf Strukturen begrenzt, die aus mindestens fünf Halos bestehen. Würde man alle darstellen, so wäre der Plot sehr unübersichtlich. Aus dem Plot ist ersichtlich, dass Strukturen bestehend aus weniger Mitgliedern überwiegen und die Zahl der Superstrukturen bei wachsender Mitgliederzahl stetig weiter abnimmt.

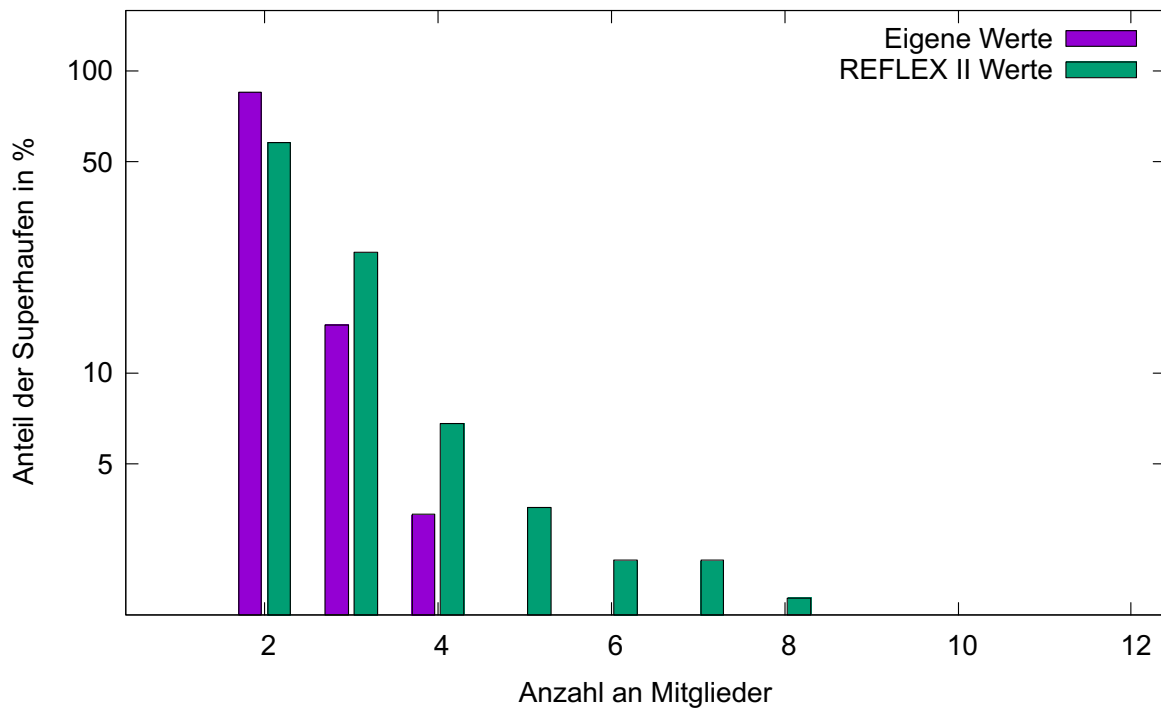


Abbildung 4.11.: Vergleich der Multiplizitätsfunktion für Box 2b

Nachdem die Berechnungen mittels des neuen Massenlimits durchgeführt wurden, ist es möglich, die erhaltenen Resultate mit den Ergebnissen der REFLEX II Beobachtung zu vergleichen. Dafür wird für beide Fälle die Multiplizitätsfunktion betrachtet. Die Werte der REFLEX II Beobachtung wurden hierfür aus Abbildung 3.1 für den Ausschnitt $f = 10$ entnommen. Hier sind allerdings keine absoluten, sondern prozentuale Werte angegeben. Dementsprechend werden mit der Gesamtzahl der gefundenen Superhaufen der Box 2b Berechnung die jeweiligen REFLEX II Werte berechnet. Wie bereits in Kapitel 3 beschrieben, gibt die Multiplizitätsfunktion die Anzahl an Galaxienhaufen innerhalb eines Superhaufens an. Der entscheidende Unterschied ist, dass bei der REFLEX II Beobachtung größere Strukturen als in Box 2b gefunden werden. Des weiteren wird bei der REFLEX II Beobachtung eine geringere Anzahl an Objekten verwendet. Beide Verteilungen werden von Paarsuperhaufen dominiert.

Des weiteren kann noch der Extend bzw. die Ausdehnung der Superhaufen untersucht werden. Dafür wird bei allen gefundenen Superhaufen die Ausdehnung, festgelegt durch die Distanz zwischen dem Massenzentrum und dem am weitesten entfernten Mitglied, bestimmt. Die Werte der REFLEX II Beobachtung werden hierfür Abbildung 3.3 entnommen. Um die jeweiligen Resultate zu vergleichen, werden zwei verschiedene Diagramme angefertigt. Abbildung 4.12 behandelt nur Paarsuperhaufen, während in Abbildung 4.13 die gesamten Resultate geplottet werden.

Die REFLEX II Ergebnisse zeigen eine deutlich breitere Verteilung, denn die gefundenen Superhaufen innerhalb von Box 2b besitzen eine maximale Ausdehnung von bis zu 25 Mpc/h. Rein physikalisch betrachtet sind Superhaufen, deren Mitglieder weiter von-

einander entfernt sind, schwächer aneinander gebunden. Dies beruht auf dem Aussehen des Newtonschen Gravitationsgesetzes. Daher werden innerhalb von Box 2b die meisten Superhaufen bei einer geringeren Ausdehnung gefunden. Da der REFLEX II Superhaufenkatalog mittels des Friends-of-Friends Algorithmus zusammengestellt wird, behandelt dieser nicht das Gravitationspotential und die Eigenbewegung der jeweiligen Elemente. Der Friends-of-Friends Algorithmus nutzt als zentrales Kriterium eine Überdichte an Materie. Somit werden die wirkenden Kräfte vernachlässigt und riesige Entfernungen zwischen den Mitgliedern treten auf. Dasselbe Verhalten zeigt sich in Abbildung 4.13, wo alle Superhaufen eingetragen sind.

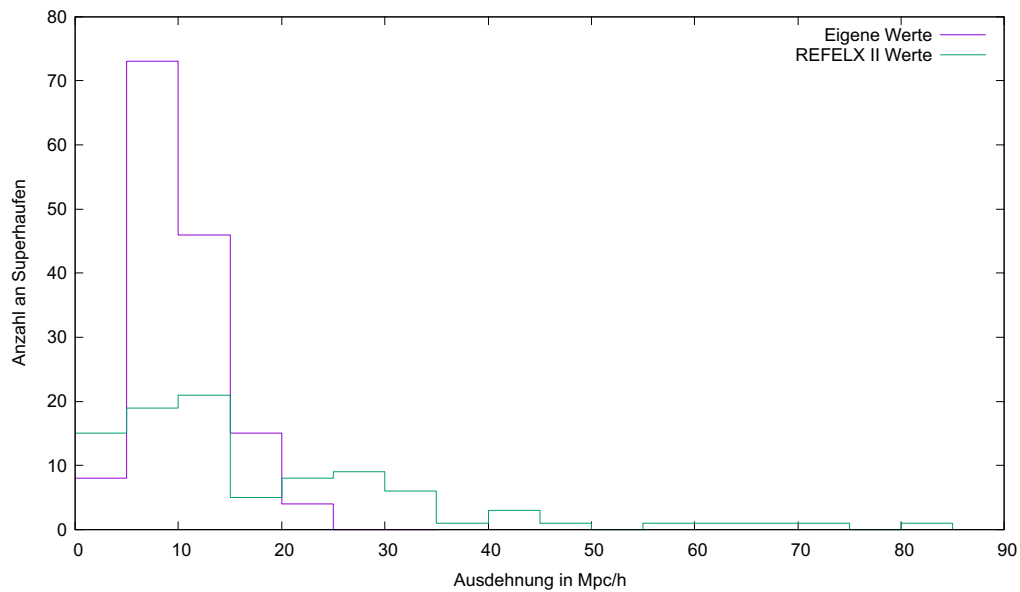


Abbildung 4.12.: Ausdehnung der Superhaufen. Hier nur Paarsuperhaufen

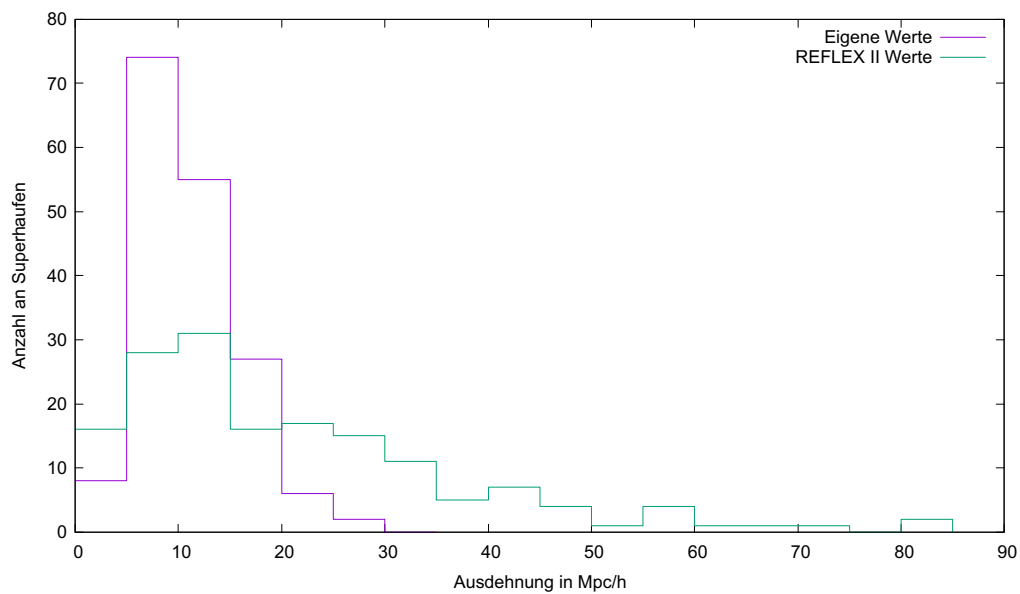


Abbildung 4.13.: Verteilung der Ausdehnung aller gefundenen Superhaufen

4.5. Resultate für Box 0

Eine analoge Betrachtung kann ebenso für die Magneticum Box 0 durchgeführt werden. Hierfür wird eine analoge Berechnung zur Box 2b durchgeführt. Um die Ergebnisse an die REFLEX II Beobachtung anpassen und vergleichen zu können, wird erneut eine Mindestmasse vorausgesetzt, damit die jeweiligen Objekte als Galaxienhaufen für die Berechnung berücksichtigt werden. Dieses Massenlimit wird bereits vor dem Beginn der Rechnung eingeführt, somit werden hier nicht alle Objekte innerhalb von Box 0 berücksichtigt. Für das Massenlimit gilt:

$$M_{min} = 6,476 \cdot 10^{13} M_{\odot}/h \quad (4.5.1)$$

Während bei Box 2b nur etwas mehr als 2.000 Objekte berücksichtigt werden, so werden bei der Berechnung der Superhaufen innerhalb von Box 0 mehr als 30.000 Objekte verwendet. Somit ist im Vorfeld zu erwarten, dass eine deutlich höhere Anzahl an Superhaufen gefunden wird. Die Ursache hierfür sind die unterschiedlichen Volumen der Boxen. Bei der Berechnung gibt es eine Einschränkung. Bei den Geschwindigkeiten der verwendeten Objekte handelt es sich nicht um die Geschwindigkeit des Galaxienhaufens sondern um die des ersten Subhalos¹⁹. Nun kann erneut nach gebundenen Strukturen gesucht werden und es werden folgende Resultate erzielt. Die Darstellung ist analog zu den Ergebnissen von Box 2b (siehe Abbildung 4.14). Jeder gebundene Galaxienhaufen ist durch ein eingefärbtes Kreuz dargestellt. Die Farbpalette am rechten Rand gibt die Anzahl an Mitglieder eines Superhaufens an.

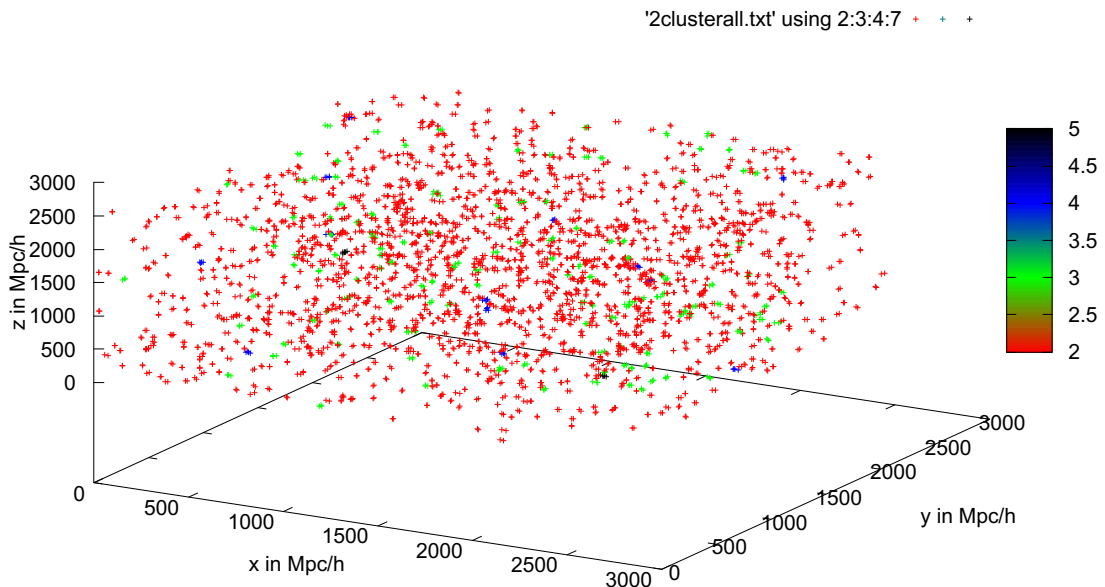


Abbildung 4.14.: Lage der Superhaufen im 3D-Raum mit Paarsuperhaufen

¹⁹Gebundene Objekte innerhalb eines Halos

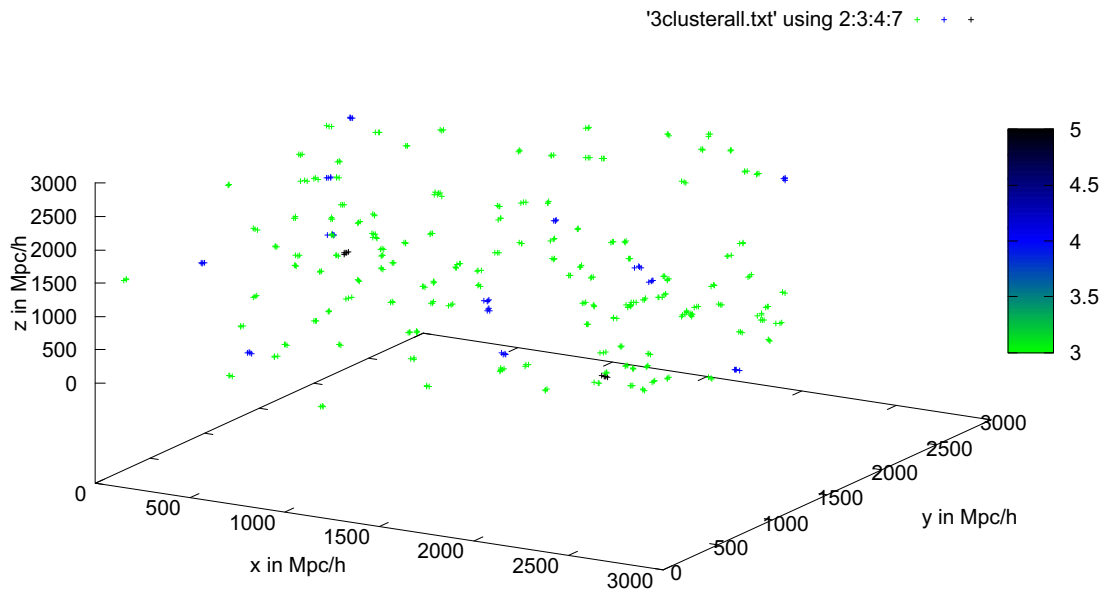


Abbildung 4.15.: Lage der Superhaufen im 3D-Raum ohne Paarsuperhaufen

Die Resultate sind in zwei verschiedenen Plots dargestellt. In Abbildung 4.14 sind alle gefundenen Superhaufen eingetragen, während in Abbildung 4.15 die Paarsuperhaufen herausgefiltert werden, um die größeren Strukturen genauer betrachten zu können. Bereits hier lässt sich erkennen, dass erneut ein Großteil der gefundenen Strukturen aus zwei Objekten bestehen. Somit dominieren erneut die Paarsuperhaufen. Im Vergleich zu den Resultaten der Box 2b werden hier auch Superhaufen bestehend aus fünf Galaxienhaufen gefunden. Des Weiteren werden mehrere Strukturen mit drei und vier Mitglieder festgestellt. Dies mag daran liegen, dass für die Berechnung der Box 0 eine deutlich größere Anzahl an Objekten verwendet wird.

Des Weiteren kann das Verhältnis zwischen Gesamtmasse und maximaler Ausdehnung eines Superhaufens betrachtet werden. Hierfür die y -Achse logarithmisch zur Basis 10 skaliert, um die Ergebnisse anschaulicher darzustellen. Ebenso wird ein linearer Fit durchgeführt, um festzustellen, ob die Resultate einen linearen Anstieg aufweisen. Das Ergebnis ist erneut ein linearer Anstieg. Jedoch ist die Steigung geringer als bei Box 2b. Hier ist zu beachten, dass die x -Achse nach der Durchführung des linearen Fits logarithmisch skaliert wurde. Somit ergibt sich keine Gerade, sondern ein gekrümmter Graph. Die einzelnen Punkte sind ebenso über einen großen Bereich gestreut. Dennoch existiert die selbe Tendenz, sodass weiter ausgedehnte Strukturen eine größere Masse besitzen. Bereits bei den Resultaten der Box 2b ließ sich feststellen (siehe Abbildung 4.5 & 4.13), dass weiter ausgedehnte und größere Strukturen eine größere Gesamtmasse besitzen. Dieses Verhalten zeigt sich hier ebenso, wobei der Zusammenhang zwischen der Zahl der Mitglieder und der jeweiligen Ausdehnung für Box 0 noch untersucht werden muss.

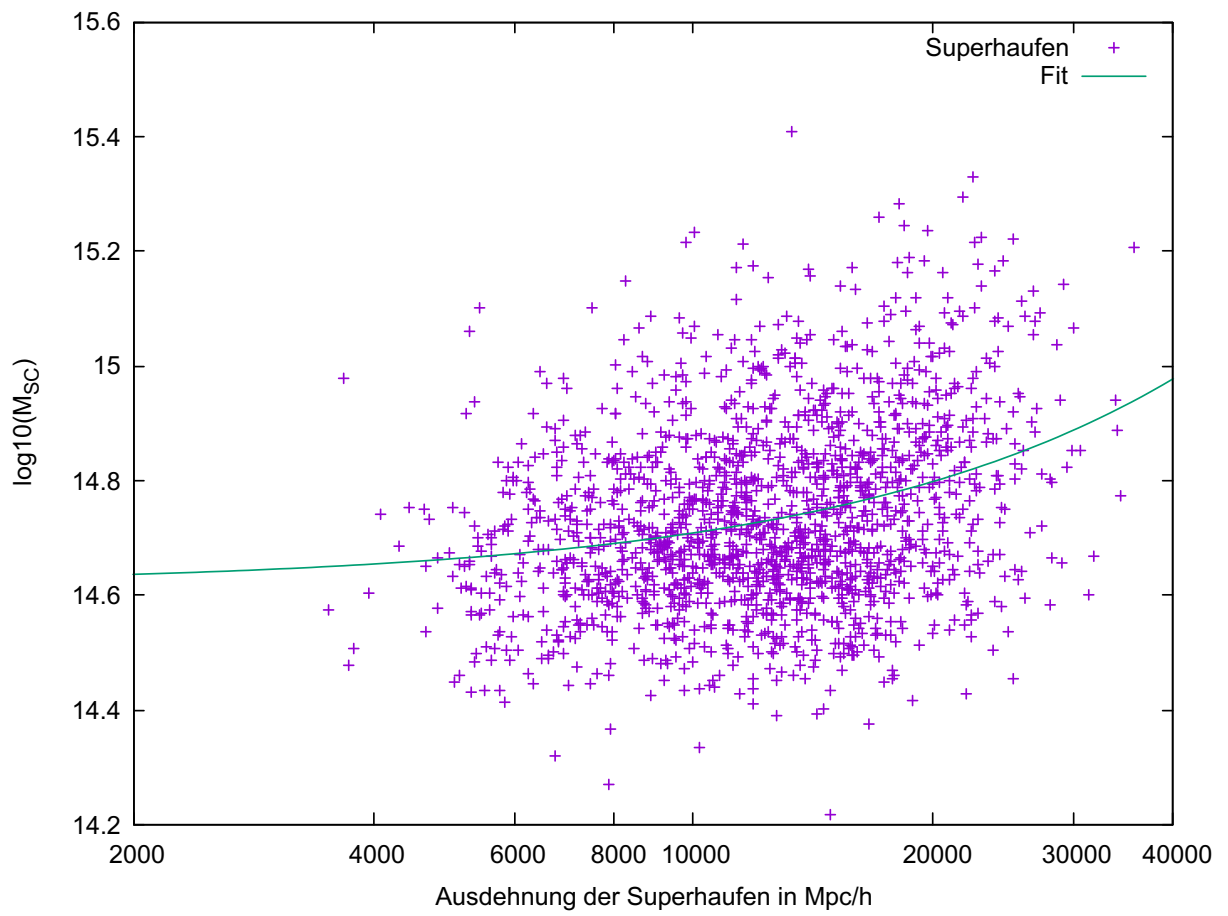


Abbildung 4.16.: Gesamtmasse der Superhaufen gegenüber deren Ausdehnung für Box 0

4.6. Vergleich der Resultate aus Box 0 mit den REFLEX II Beobachtungen

Um die Ergebnisse mit den REFLEX II Beobachtung zu vergleichen, muss erneut das Kriterium der Mindestmasse der Objekte berücksichtigt werden. Dieser Kriterium wird bereits in Unterkapitel 4.4 definiert. Dies ist in diesem Fall aber nicht mehr erforderlich, da die komplette Berechnung innerhalb der Box 0 unter Verwendung dieses Kriteriums stattgefunden hat. Die Werte der REFLEX II Beobachtung werden aus Abbildung 3.2 aus dem Ausschnitt $f = 10$ verwendet. Da die Angaben in diesem Diagramm in Prozent gemacht wurde, ist es erforderlich, diese in absolute Werte umzurechnen. Dies ist möglich, da die Gesamtanzahl der gefundenen Superhaufen innerhalb von Box 0 bekannt ist. Das Resultat ist in Abbildung 4.17 dargestellt.

Im Vergleich zu Box 2b liefert die durchgeführte Berechnung bei Box 0 eine deutlich höhere Anzahl an Superhaufen, da eine größere Zahl an Objekten verwendet wurde. Der Abbildung lässt sich entnehmen, dass die Verteilung erneut von Paarsuperhaufen dominiert wird. Erneut liefern die REFLEX II Beobachtungen größere Strukturen, als Box 0. Um die eigene Rechnung durchzuführen, werden mehr als 30.000 Objekte verwendet, während für den REFLEX II Superhaufen nur knapp 1.000 Objekte verwendet wurden. Daher ist es erstaunlich, dass weder für Box 2b noch Box 0 Strukturen dieser Größenordnung gefunden wurden.

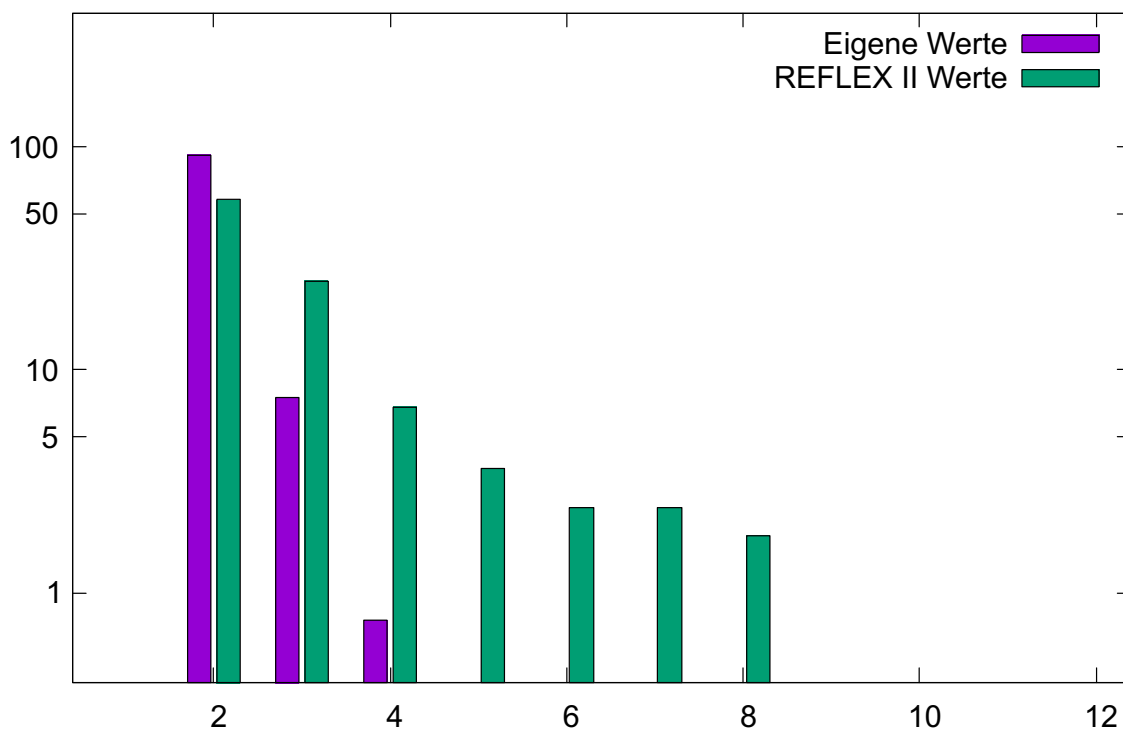


Abbildung 4.17.: Vergleich der Mutlplizitätsfunktion für Box 0

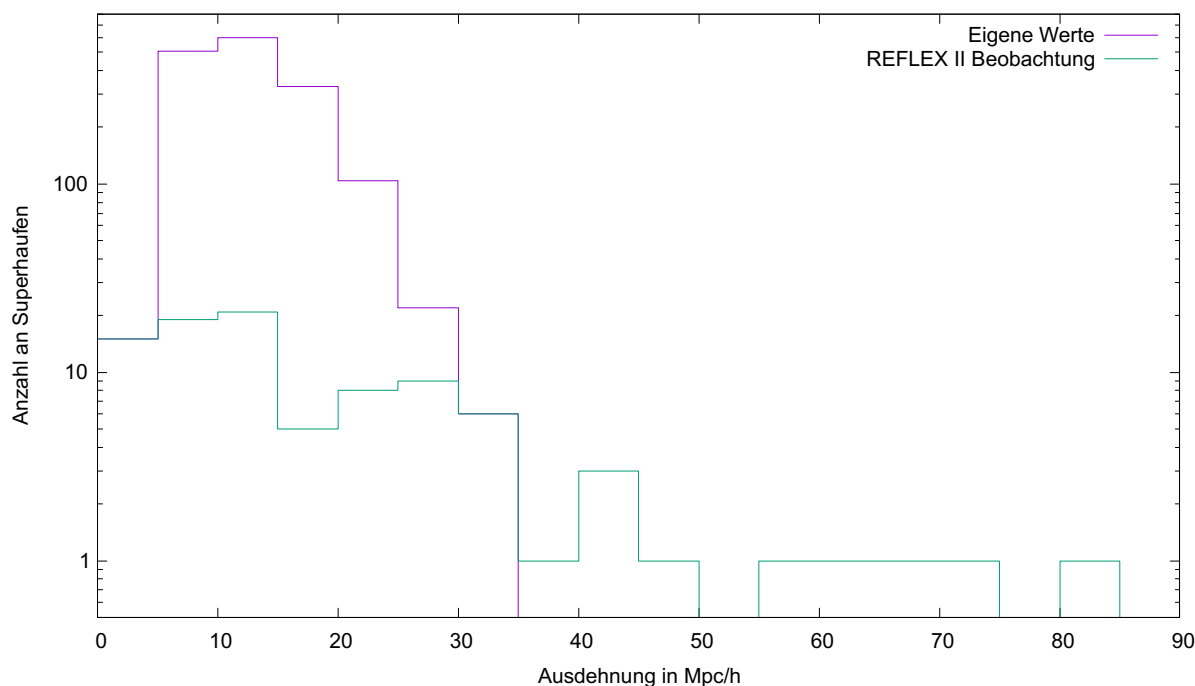


Abbildung 4.18.: Ausdehnung der Superhaufen. Hier nur Paarsuperhaufen

Neben der bereits in Kapitel 3 erwähnten Multiplizität kann noch die Ausdehnung der einzelnen Superhaufen untersucht werden. Das Ergebnis ist in zwei verschiedenen Plots dargestellt. Abbildung 4.18 beschränkt sich allein auf Superhaufen, bestehend aus zwei Galaxienhaufen. Hier ist jedoch zu beachten, dass nur die jeweilige Verteilung betrachtet werden soll, denn bei der Berechnung für Box 0 wird eine deutlich höhere Zahl an Objekten verwendet. Betrachtet man die Resultate aus Box 0, so lässt sich erkennen, dass die hier gefundenen Superhaufen eine deutlich geringere Ausdehnung, als Objekte der REFLEX II Beobachtung aufweisen. Die größten Objekte erstrecken sich über bis zu 35 Mpc/h, während die Superhaufen aus dem REFLEX II Katalog bis zu 80 Mpc/h groß werden. Es stellt sich nun die Frage, welches der beiden Ergebnisse das realistischere ist. Theoretisch betrachtet, sollte man innerhalb der Box 0 Strukturen dieser Größe finden, falls diese wirklich existieren. Wie bereits in vorherigen Unterkapiteln erwähnt, besitzen Superhaufen mit einer größeren Ausdehnung ein geringeres Gravitationspotential und somit eine schwächere Bindung. Daraus folgt, dass eben diese Strukturen anfälliger für Störungen sind. Außerdem kann man sich die Frage stellen, ob die Elemente dieser Strukturen aneinander gravitativ gebunden sind. Im Vergleich dazu basiert die Berechnung der Box 0 Superhaufen rein auf der Bindung und der Eigenbewegung der Galaxienhaufen.

Abschließend sind in Abbildung 4.19 alle Superhaufen eingetragen. Hier zeigt sich die selbe Tendenz, da die Verteilung durch Paarsuperhaufen dominiert wird. Somit ergibt sich ein leichter Anstieg der Anzahl an Superhaufen. Vor allem im Bereich höherer Ausdehnung scheint es einen Anstieg gegeben zu haben.

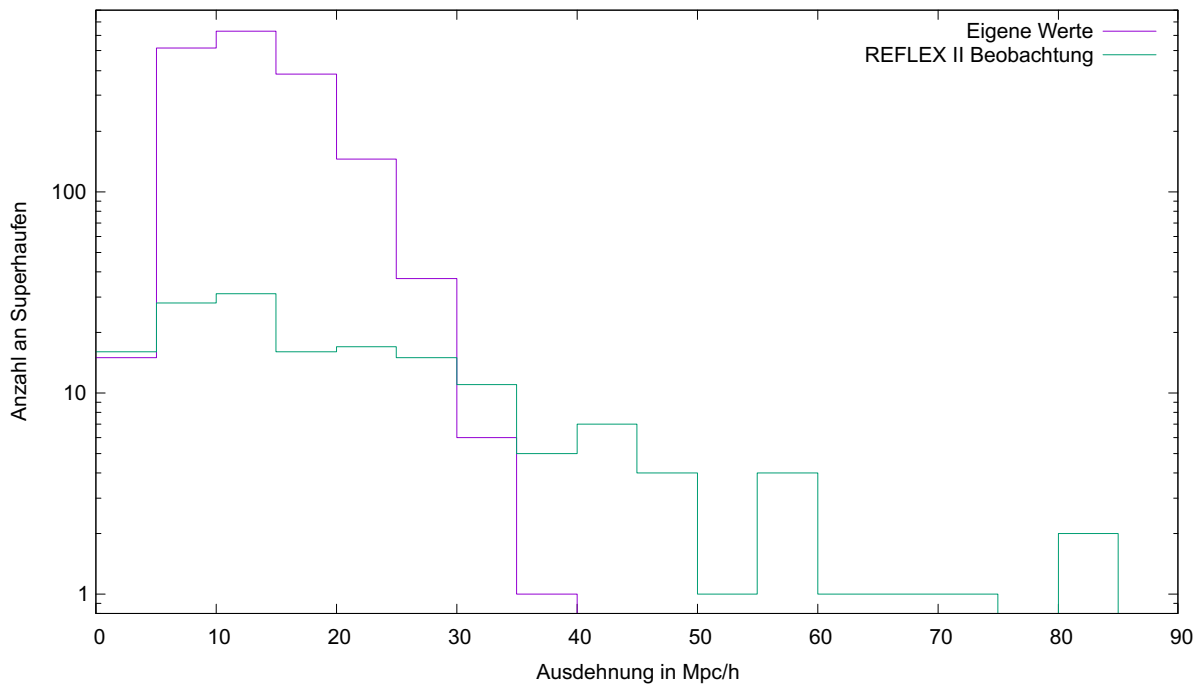


Abbildung 4.19.: Ausdehnung aller gefundenen Superhaufen

5. Fazit

In meiner Arbeit beschäftigte ich mich mit den Magneticum Simulationen Box 0 und 2b und suchte innerhalb dieser nach gebundenen Strukturen. Die hier erhaltenen Ergebnisse konnten nach verschiedenen Gesichtspunkten untersucht werden. Diese Resultate ließen sich somit mit echten Beobachtungsdaten vergleichen. Allerdings muss hier beachtet werden, dass die Superhaufen durch zwei verschiedene Methoden zusammengestellt wurden. Der REFLEX II Superhaufenkatalog basiert auf dem Friends-of-Friends Algorithmus, welcher innerhalb eines Bereiches nach bestimmten Strukturen sucht, während meine Arbeit auf den wirkenden physikalischen Kräften und ablaufenden Prozessen beruht. Die Superhaufen wurden unter Verwendung des Gravitationspotentials und der Eigenbewegung der jeweiligen Objekte zusammengestellt. Somit wurden Strukturen, basierend auf einer physikalischen Bindung gefunden und aussagekräftige Resultate erzielt.

Wie bereits in Kapitel 4 erwähnt, wurden bei der REFLEX II Beobachtung Strukturen bestehend aus einer deutlich größeren Anzahl an Galaxienhaufen gefunden. Der Friends-of-Friends Algorithmus nutzt aber nur die jeweiligen Überdichten und vernachlässigt somit die wirkenden physikalischen Kräfte. Somit werden riesige Strukturen gefunden, aber es bleibt weiterhin unbekannt ob die einzelnen Objekte aneinander gebunden sind. Daher ist es durchaus möglich, dass nicht jedes einzelnes Objekt an dem Superhaufen gebunden ist.

Dabei wurden allerdings die jeweiligen Wechselwirkungen zwischen den jeweiligen Mitgliedern vernachlässigt, denn das Gravitationspotential wurde nur zwischen dem Zentrum und dem jeweiligen Mitglied berechnet. Für eine noch genauere Betrachtung sollten diese noch berücksichtigt werden.

Danksagung

An dieser Stelle möchte ich mich bei meinem Betreuer PD Dr. Klaus Dolag, der es mir ermöglicht hat, mich mit diesem interessanten Thema auseinander zusetzen, für Hilfestellungen und die engagierte Betreuung bedanken.

Abschließend möchte ich mich bei meinen Eltern Stephan und Christiane bedanken, die mir mein Studium durch ihre Unterstützung ermöglicht haben und stets ein offenes Ohr für meine Sorgen hatten.

Literaturverzeichnis

- [1] Neta A. Bahcall. Hubble's law and the expanding universe. 2015. <http://www.pnas.org/content/112/11/3173.full.pdf>,[aufgerufen am 12.06.2017].
- [2] Hans Böhringer, Gayoung Chon, and Nina Nowak. The extended rosat-eso flux-limited x-ray galaxy cluster survey (reflex ii) - iii.construction of the first flux-limited supercluster sample. 2013. <https://arxiv.org/abs/1212.1597>,[aufgerufen am 05.06.2017].
- [3] Hans Böhringer, Gayoung Chon, and Saleem Zaroubi. On the definition of superclusters. 2015. <https://arxiv.org/abs/1502.04584>,[aufgerufen am 05.06.2017].
- [4] Hans Böhringer, Chris A. Collins, Gayoung Chon, and Martin Krause. Characterising superclusters with the galaxy cluster distribution. 2014. <https://arxiv.org/abs/1406.4377>,[aufgerufen am 05.06.2017].
- [5] Wolfgang Demtröder. Demtröder Experimentalphysik 1. 2008. 1.Auflage.

Abbildungsverzeichnis

2.1. Linking Length als Funktion der Rotverschiebung der Galaxienhaufen, $f = 2$ gepunktete Linie, $f = 10$ durchgezogene Linie, $f = 100; 500$ gestrichelte Linie Credits: Chon et al. (2013) ' The extended ROSAT-ESO Flux-Limited X-ray Galaxy Cluster Survey (REFLEX II) - III. Construction of the first flux-limited supercluster sample '	12
2.2. Anzahl der Superhaufen als Funktion des Überdichteparameters f Credits: Chon et al. (2013) ' The extended ROSAT-ESO Flux-Limited X-ray Galaxy Cluster Survey (REFLEX II) - III. Construction of the first flux-limited supercluster sample '	13
2.3. Überdichteparameter f als Funktion der Rotverschiebung der Galaxienhaufen Credits: Chon et al. (2013) ' The extended ROSAT-ESO Flux-Limited X-ray Galaxy Cluster Survey (REFLEX II) - III. Construction of the first flux-limited supercluster sample '	15
3.1. Multiplizitätsfunktion als Funktion der Anzahl der Mitglieder eines Superhaufens Credits: Chon et al. (2013) ' The extended ROSAT-ESO Flux-Limited X-ray Galaxy Cluster Survey (REFLEX II) - III. Construction of the first flux-limited supercluster sample '	18
3.2. Multiplizitätsfunktion als Funktion der Anzahl der Mitglieder eines Superhaufens Credits: Chon et al. (2013) ' The extended ROSAT-ESO Flux-Limited X-ray Galaxy Cluster Survey (REFLEX II) - III. Construction of the first flux-limited supercluster sample '	19
3.3. Anzahl der Superhaufen als Funktion deren Ausdehnung Credits: Chon et al. (2013) ' The extended ROSAT-ESO Flux-Limited X-ray Galaxy Cluster Survey (REFLEX II) - III. Construction of the first flux-limited supercluster sample '	19
4.1. Dreidimensionale Darstellung aller Halos innerhalb von Box 2b	21
4.2. Kinetische und potentielle Energie als Funktion des Abstandes für einen einzelnen Superhaufen	25
4.3. Lage der Superhaufen innerhalb Box 2b, bestehend aus mindestens zwei Galaxienhaufen	25
4.4. Lage der Superhaufen innerhalb Box 2b, bestehend aus mindestens zehn Galaxienhaufen	26
4.5. Gesamtmasse der Superhaufen innerhalb Box 2b gegenüber deren Ausdehnung	27
4.6. Histogramm der Multiplizitätsfunktion für Box 2b	28
4.7. Ausdehnung der Superhaufen in Box 2b	29

4.8. Größter Superhaufen innerhalb Box 2b mit jeweiligen Geschwindigkeitsvektoren	30
4.9. Lage der Superhaufen innerhalb von Box 2b unter Berücksichtigung des Massenlimits	31
4.10. Strukturverbände bestehend aus Halos innerhalb der Box 2b	32
4.11. Vergleich der Multiplizitätsfunktion für Box 2b	33
4.12. Ausdehnung der Superhaufen. Hier nur Paarsuperhaufen	34
4.13. Verteilung der Ausdehnung aller gefundenen Superhaufen	34
4.14. Lage der Superhaufen im 3D-Raum mit Paarsuperhaufen	35
4.15. Lage der Superhaufen im 3D-Raum ohne Paarsuperhaufen	36
4.16. Gesamtmasse der Superhaufen gegenüber deren Ausdehnung für Box 0	37
4.17. Vergleich der Multiplizitätsfunktion für Box 0	38
4.18. Ausdehnung der Superhaufen. Hier nur Paarsuperhaufen	39
4.19. Ausdehnung aller gefundenen Superhaufen	40

A. Erklärung zur Bachelorarbeit

Hiermit erkläre ich, dass ich die vorliegende Arbeit eigenständig und ohne fremde Hilfe angefertigt habe. Textpassagen, die wörtlich oder dem Sinn nach auf Publikationen oder Vorträgen anderer Autoren beruhen, sind als solche kenntlich gemacht. Die Arbeit wurde bisher keiner anderen Prüfungsbehörde vorgelegt und auch noch nicht veröffentlicht.

München, 31.07.2017

Ort, Datum

Unterzeichner

B. C++ - Programmcode

Der folgende Quellcode wurde verwendet, um gebundene Superhaufen zu finden. Er bildete die Grundlage für die Arbeit und ermöglichte die verwendeten Plots.

```
1 #include<iostream>
2 #include<cmath>
3 #include<fstream>
4 #include<sstream>
5 #include<vector>
6
7 using namespace std;
8
9 class vec //Definition Klasse Vektor
10 {
11     public:
12         double comp[3];
13         vec() {comp[0]=comp[1]=comp[2]=0;}
14         vec(double x, double y, double z){comp[0]= x, comp[1]= y, comp[2]= z;
15         };
16     };
17 double newton(double R, double mass, double m_max)
18 //Potentielle Energie der jeweiligen Galaxienhaufen
19 {
20     double M, G, q, U, j;
21     j = 3.086e19*0.6774; // Umrechnung kpc/h in m
22     G = 6.674e-11;
23     M = m_max*1.989e30*0.6774; //Masse des schwersten Galaxienhaufen
24     q = mass*1.989e30*0.6774;
25     // Masse des jeweiliegen Galaxienhaufens im Abstand R in kpc/h
26     U = -G*q*M/(R*j);
27
28     return U;
29 }
30
31 vec distanz(vec x0, vec b) //Verbindungsvektor von 2 Superhaufen in kpc/h
32 {
33     vec r;
34     r.comp[0]=b.comp[0]-x0.comp[0];
35     r.comp[1]=b.comp[1]-x0.comp[1];
36     r.comp[2]=b.comp[2]-x0.comp[2];
37     return r;
38 }
39
40 double betrag(vec r)
41 //Laenge Verbindungsvektor, Abstand der Galaxienhaufen in kpc/h
42 {
43     double R;
```

```
44   R=sqrt((r.comp[0]*r.comp[0])+(r.comp[1]*r.comp[1])+(r.comp[2]*r.comp[2])
45   );
46   return R;
47 }
48 double Ekin(vec v0,vec v, double mass) //E_kin des jeweiligen
49   Galaxienhaufens
50 {
51   double T, k, q, v1, v2, v3;
52   k = pow(10,3); // km/s in m/s
53   q = mass*1.989e30*0.6774;
54   v1 = (v0.comp[0]-v.comp[0])*k;
55   v2 = (v0.comp[1]-v.comp[1])*k;
56   v3 = (v0.comp[2]-v.comp[2])*k;
57   T = 0.5*q*(v1*v1+v2*v2+v3*v3);
58   return T;
59 }
60 double xpos(vec b) //x-Koordinate im 3D-Raum
61 {
62   double xp;
63   xp=b.comp[0];
64   return xp;
65 }
66 double ypos(vec b) //y-Koordinate im 3D-Raum
67 {
68   double yp;
69   yp=b.comp[1];
70   return yp;
71 }
72 double zpos(vec b) //z-Koordinate im 3D-Raum
73 {
74   double zp;
75   zp=b.comp[2];
76   return zp;
77 }
78 double velx(vec v) //Geschwindigkeit in x-Richtung
79 {
80   double velox;
81   velox=v.comp[0];
82   return velox;
83 }
84 double vely(vec v) //Geschwindigkeit in y-Richtung
85 {
86   double veloy;
87   veloy=v.comp[1];
88   return veloy;
89 }
90 double velz(vec v) //Geschwindigkeit in z-Richtung
91 {
92   double veloz;
93   veloz=v.comp[2];
94   return veloz;
95 }
96
```

```

97 double vhx (vec x0, vec b) //Hubble-Geschwindigkeit in x-Richtung
98 {
99     double H, k;
100    double velhx;
101    H = 67.74/(3.086e19);
102    k = 0.6774*3.086e16; // Umrechnung kpc/h in km
103    velhx= H*(x0.comp[0]-b.comp[0])*k;
104    return velhx;
105 }
106 double vhy (vec x0, vec b) //Hubble-Geschwindigkeit in y-Richtung
107 {
108     double H, k;
109     double velhy;
110     H = 67.74/(3.086e19);
111     k = 0.6774*3.086e16; // Umrechnung kpc/h in km
112     velhy= H*(x0.comp[1]-b.comp[1])*k;
113     return velhy;
114 }
115 double vhz (vec x0, vec b) //Hubble-Geschwindigkeit in z-Richtung
116 {
117     double H, k;
118     double velhz;
119     H = 67.74/(3.086e19);
120     k = 0.6774*3.086e16; // Umrechnung kpc/h in km
121     velhz= H*(x0.comp[2]-b.comp[2])*k;
122     return velhz;
123 }
124
125 double MASS(double mass)
126 {
127     double m;
128     m=mass;
129     return m;
130 }
131
132 vec houble(vec x0, vec b)
133 {
134     double H, k;
135     vec w;
136     H = 67.74/(3.086e19);
137     k = 0.6774*3.086e16; // Umrechnung kpc/h in km
138     w.comp[0]= H*(x0.comp[0]-b.comp[0])*k;
139     w.comp[1]= H*(x0.comp[1]-b.comp[1])*k;
140     w.comp[2]= H*(x0.comp[2]-b.comp[2])*k;
141
142     return w;
143 }
144
145 double Ekin1(vec v0, vec v, double mass, vec w)
146 //E_kin1 des jeweiligen Galaxienhaufens + Hubble-Expansion
147 {
148     double T, k, q, v1, v2, v3;
149     k = pow(10,3); // km/s in m/s
150     q = mass*1.989e30*0.6774;
151     v1 = v0.comp[0]-v.comp[0]+w.comp[0];

```

```

152     v2 = v0.comp[1]-v.comp[1]+w.comp[1];
153     v3 = v0.comp[2]-v.comp[2]+w.comp[2];
154     T = 0.5*q*(v1*v1+v2*v2+v3*v3)*k*k;
155     return T;
156 }
157
158 int main()
159 {
160
161     vector<vec> b;
162     vector<vec> v;
163     vector<double> mass;
164     vector<int> sc_index;
165
166     string line;
167     ifstream infile;
168
169     infile.open("webdata.txt");
170
171     if (infile.is_open())
172     {
173         while ( getline (infile ,line) ) //Einlesen der Daten
174         {
175             stringstream ss(line);
176             double id, snap, uid, x, y, z, xp, yp, is, M500, r500, gasf, starf,
177                 Tem, Lx, Y500, Msat, csh, vx, vy, vz;
178             ss >> id >> snap >> uid >> x >> y >> z >> xp >> yp >> is >> M500 >>
179                 r500 >> gasf >> starf >> Tem >> Lx >> Y500 >> Msat >> csh >> vx
180                 >> vy >> vz;
181
182             b.push_back(vec(x,y,z)); // Befehl Auslesen von Vektoren
183             v.push_back(vec(vx,vy,vz));
184             mass.push_back(M500); // Befehl Auslesen von einzelnen Werten
185             sc_index.push_back(-1); // gibt jedem Element Zusatz -1
186         }
187         infile.close();
188     }
189     double m_max;
190     int index, left=1, icluster=0;
191     vec x0,v0;
192     while(left >0)
193     {
194         m_max=-1;
195         for(int i_out=0;i_out<b.size();i_out++)
196         {
197             if(mass[i_out]>m_max && sc_index[i_out]==-1)
198             {
199                 x0=b[i_out];
200                 index=i_out;
201                 m_max=mass[i_out];
202                 v0=v[i_out];
203                 // finde maximale Masse und verwende diese
204             }
205         }
206         if(sc_index[index]<0)
207             left++;

```

```

204 }
205 int nmember=0;
206 for(int i=0;i<b.size();i++)
207 {
208     double U, R, T, T1, t, S, xp, yp, zp, m, velox, veloy, veloz;
209     U = log10(-newton(betrag(distanz(x0, b[i])), mass[i], m_max));
210     R = log10(betrag(distanz(x0, b[i])));
211     T = log10(Ekin(v0, v[i], mass[i]));
212     T1 = log10(Ekin1(v0, v[i], mass[i], houble(x0, b[i])));
213     S = U - T1;
214     xp=xpos(b[i]);
215     yp=ypos(b[i]);
216     zp=zpos(b[i]);
217     velox=velx(v[i]);
218     veloy=vely(v[i]);
219     veloz=velz(v[i]);
220     m=MASS(mass[i]);
221     // Ausgabe der Position, Geschwindigkeit und Masse
222     if (S>=0 && sc_index[i]==-1)
223     {
224         sc_index[i]=icluster;
225         nmember++;
226         //Feststellen der Anzahl der Mitglieder eines Superhaufens
227     }
228 }
229 if(nmember>=5) //Beschraenkung der Anzahl der Mitglieder
230     for(int i=0;i<b.size();i++)
231     {
232         double xp, yp, zp, m, R, velox, veloy, veloz, velhx, velhy,
233             velhz;
234         xp=xpos(b[i]);
235         yp=ypos(b[i]);
236         zp=zpos(b[i]);
237         velox=velx(v[i]);
238         veloy=vely(v[i]);
239         veloz=velz(v[i]);
240         velhx=vhx(x0, b[i]);
241         velhy=vhy(x0, b[i]);
242         velhz=vhz(x0, b[i]);
243         m=MASS(mass[i]);
244         R =(betrag(distanz(x0, b[i])));
245         if(sc_index[i]==icluster)
246             // cout<<xp/1000<<" \t "<<yp/1000<<" \t "<< zp/1000<<" \t "
247             //<<velox<<" \t "<<veloy<<" \t "<<veloz<<endl;
248             //cout<<xp/1000<<" \t "<<yp/1000<<" \t "<< zp/1000<<" \t "
249             //<<-0.5*velhx/100<<" \t "<<-0.5*velhy/100<<" \t "
250             //<<-0.5*velhz/100<<" \t "<<endl;
251             cout<<icluster<<" \t "<<xp/1000<<" \t "<<yp/1000<<" \t "
252             << zp/1000<<" \t "<<nmember<<" \t "<< m << endl;
253     }
254     icluster++;
255 }
256 return 0;
257 }

```