

Aufgabe 3: Simulation wechselwirkender Galaxien auf parabolischen Orbits

Einführung

Viele Galaxien zeigen Strukturen, die auf Wechselwirkungen mit anderen Galaxien zurückzuführen sein können. Außerdem gibt es Paare oder ganze Systeme von Galaxien, die sich gegenseitig durch Gravitationswechselwirkung stark beeinflussen. Um ein klareres Bild dieser Vorgänge zu erhalten, ist die Astronomie auf Simulationen angewiesen.

Dabei finden so genannte N-Körper-Rechnungen Verwendung. Diese beschreiben das Kepler-Problem eines Systems von N Teilchen mithilfe der Newtonschen Bewegungsgleichungen. Heutzutage müssen wir trotz Hochleistungsrechnern auf Vereinfachungen und Näherungen zurückgreifen, da die Teilchenzahlen zu groß sind.

Die in unserem Fall angewandte Methode ist die „restricted N-body method“. Dabei wird das gekoppelte N-Körper-Problem in N Einkörper-Probleme zerlegt, welche mit einem einfachen und genauen Verfahren lösbar sind. Angenommen wird hierbei, dass die Galaxien sich auf Keplerbahnen (parabolisch) bewegen, und ihre Masse sich in einem sehr kleinen, ungestörten Zentralbereich (Punktmasse) befindet. Damit wird ein Potential definiert, in dem sich die Sterne oder Sterngruppen bewegen, und deren Bewegungsgleichungen können integriert werden.

Programmierung

Wir mussten mit Hilfe der Numerical Recipes ein Programm schreiben, welches die Bewegung zweier Galaxien mit unterschiedlicher Masse auf parabolischen Orbits berechnet. Als Anfangsparameter sind die beiden Galaxienmassen, der Startabstand zwischen beiden Galaxien, sowie der Minimalabstand zwischen den beiden einzugeben. Ausgeben werden die Koordinaten der beiden Galaxien im Schwerpunktssystem nach äquidistanten Zeitintervallen. Um dies zu bewerkstelligen wird zu aller erst einmal der Startzeitpunkt aus den eingegebenen Anfangsbedingungen errechnet:

$$\theta_{Start} = \arccos\left(-1 + \frac{2R_{min}}{R_{Start}}\right)$$

$$t_{Start} = \frac{l^3}{2M_{red}k^2} \left(\tan\left(\frac{\theta_{Start}}{2}\right) + \frac{1}{3} \tan^3\left(\frac{\theta_{Start}}{2}\right) \right)$$

Als Abbruchbedingung haben wir das vollständige Durchlaufen einer symmetrischen Parabel gewählt; somit ist $t_{Ende} = -t_{Start}$. Für die Berechnung der Koordinaten musste die Gleichung:

$$t = \frac{l^3}{2M_{red}k^2} \left(\tan\left(\frac{\theta}{2}\right) + \frac{1}{3} \tan^3\left(\frac{\theta}{2}\right) \right)$$

nach dem Winkel θ gelöst werden. Dazu verwendeten wir aus den Numerical Recipes die Funktion „rtsafe“. Dieser Funktion muss eine weitere Funktion übergeben werden, welche die zu lösenden Gleichung in ihrer holonomen Form und deren Ableitung nach dem zu

auflösenden Parameter enthält. Die weiteren Parameter von „rtsafe“ ist das Intervall in dem die zu suchende Nullstelle liegt und Genauigkeit. Wir hatten die obige Gleichung einerseits mit „rtsafe“ direkt zu lösen und andererseits als Polynom 3. Grades in $\tan(\theta/2)$ zu lösen. Der Vergleich der Rechenzeiten zwischen beiden Methoden zeigte uns, dass es etwas schneller ist, wenn man sie direkt nach dem Winkel θ numerisch löst. Da die indirekte Methode um etwa 11% mehr Zeit in Anspruch nimmt, haben wir uns entschieden für die weitere Arbeit nur mehr die direkt Lösungsmethode zu verwenden. Mit den numerisch ermittelten Wert von θ kann man nun den Abstand R :

$$R = \frac{2R_{\min}}{1 + \cos(\theta)}$$

zu dem jeweiligen Zeitpunkt errechnen. Daraus kann man nun die Koordinaten der Galaxien berechnen:

$$\bar{R}_1 = -\frac{M_2}{M_1 + M_2} \begin{pmatrix} R \cos(\theta) \\ R \sin(\theta) \end{pmatrix}$$
$$\bar{R}_2 = \frac{M_1}{M_1 + M_2} \begin{pmatrix} R \cos(\theta) \\ R \sin(\theta) \end{pmatrix}$$

Diese Berechnung wurde im Programm in eine eigene Funktion namens „Posi“ ausgelagert.

Im zweiten Teil der Aufgabe mussten wir nun auch die Bewegung Testteilchen im Gravitationspotential beider Galaxien berechnen. Hierzu verwendeten wir die Routine „odeint“ aus den Numerical Recipies. Mit dieser Funktion kann man Systeme von gewöhnlichen Differentialgleichungen lösen. Ihr wird unter anderem eine weitere Funktion, welche wir „derivs“ nannten übergeben in der das zu lösende Gleichungssystem definiert ist. Weiters ist auch ein Parameter „ystart“ zu übergeben, welcher am Anfang die Startwerte des Differentialgleichungssystems enthält und in dem nach der Berechnung das Ergebnis übergeben wird. Darüber hinaus ist auch ein Zeitintervall für die Integration, deren Genauigkeit, die Startschrittweite und die minimale Schrittweite zu übergeben. Wir haben zur Optimierung unseres Programms einen weiteren Parameter hinzugefügt, in dem man die Funktion die letzte Schrittweite ausgibt. Diese wird für jedes Testteilchen in einem Array zwischengespeichert und als neue Startschrittweite im nächsten Rechenschritt wieder übergeben. Somit braucht „odeint“ nicht jedes Mal von neuem eine optimale Schrittweite suchen, sondern weiß schon von der vorherigen Berechnung wo diese ungefähr liegt und das Programm spart somit etwas Rechenzeit. Wir haben versucht, die Bahnberechnung für die Testteilchen auf zwei verschiedene Arten durchzuführen. Die erste Art war, dass in jedem Schleifendurchlauf die Positionen der beiden Galaxien berechnet werden und dann für diesen Zeitschritt die Testteilchen in einem statischen Potential berechnet werden. Hierzu muss man jedoch annehmen, dass die Bewegung der Galaxien im betrachteten Zeitintervall hinreichend klein gegenüber der Bewegung der Testteilchen ist. Die andere Variante war, dass die Positionen der Galaxien in der Funktion „derivs“ für jedes Testteilchen bei jedem Aufruf neu berechnet werden und somit bei den Bahnberechnung mitintegriert werden. Um den qualitativen Unterschied zwischen beiden Methoden zu testen, mussten wir die gleichförmige geradlinige Bewegung einer Galaxie(ohne Störung) betrachten. In diesem Testmodell berechneten wir dann die Abweichung der Testteilchen von der initialen Kreisbahn. Hierzu entwickelten wir die Funktion „kreisabwd“, welche uns die relative Abweichung von der Kreisbahn und die Anzahl der Umläufe des Testteilchens um die Galaxie ausgab. Es zeigte sich sehr deutlich, dass man für die erste Variante die Zeitintervall so extrem klein machen muss um in den geforderten 1% Abweichung pro 10 Umläufen zu bleiben, sodass das zweite Verfahren obwohl es in jedem internen Schritt die Koordinaten der Galaxien neu berechnen muss um ein vielfaches schneller ist. Folglich arbeiteten wir nur mit dem zweiten Modell weiter und verwarfen das andere. Die nach all dem Test endgültige Programmversion arbeitet nun wie folgt: zuerst können die Startparameter entweder von einer Eingabedatei eingelesen werden oder auch direkt am Bildschirm eingegeben werden. Dazu zählen die Massen die beiden Galaxien, deren Start- und Minimalabstand, sowie die Anzahl der Galaxien(also eine oder beide) welche von Testteilchen umgeben sind. Weiters sind auch die Anzahl der äquidistanten Ringe mit Testteilchen, sowie deren Abstand und die Anzahl der Testteilchen pro Ring solche Parameter. Die Genauigkeit der Berechnung und der Softeningparameter sind ebenso einzugeben wie auch die Winkel um die die Scheiben der Galaxien gedreht werden sollen. Darüber hinaus kann man auch noch die optionalen Berechnungen wie die des Massenflusses und des Massenverlustes und dazugehöriger Parameter auswählen. Danach werden einmal alle Variablen initiiert und deren Startwerte berechnet. Für die Testteilchen zuerst einfach eine ihrem galaktozentrischen Abstand entsprechende Kreisbahngeschwindigkeit:

$$v_{Kreis} = \sqrt{\frac{GM_{Gal}}{r_{cen}}}$$

ermittelt. Danach wird die Ebene der Scheibe(Koordinaten und Geschwindigkeiten) entsprechenden den Vorgaben mit einer Rotationsmatrix gedreht. Anschließend werden die

Testteilchen an dem Ort der Galaxie verschoben und zu ihrer Geschwindigkeit wird noch die Geschwindigkeit der Galaxie addiert. Diese lässt sich analytisch nach aus den Gleichungen für deren Position bestimmen:

$$v_{Gal1_x} = -\frac{M_2}{M_1 + M_2} \frac{dx}{dt} = \frac{M_2}{M_1 + M_2} R_{\min} \sin(\theta) \frac{M_{red} k^2}{l^3}$$

$$v_{Gal2_y} = -\frac{M_2}{M_1 + M_2} \frac{dy}{dt} = -\frac{M_2}{M_1 + M_2} R_{\min} \cos^2\left(\frac{\theta}{2}\right) \frac{2M_{red} k^2}{l^3}$$

Danach kommt schon die Hauptschleife des Programms. In dieser wird immer ein dem Ausgabeintervall entsprechender Zeitschritt berechnet und für diesen für jedes Testteilchen die Bahnintegration mittels „odeint“ ausgeführt. Am Ende der Schleife werden die Koordinaten der Testteilchen mit der vorgefertigten Funktion „outbod“ ausgegeben. Das Programm verfügt weiters über zwei Zusatzfunktionen, welche in der Aufgabe optional gefragt sind. Für den Massenfluss durch die Wechselwirkung ist der Mindestabstand eines Teilchen zur jeweils Nicht-Mutter-Galaxie zu berechnen. Da dieser so und so bei der jedem Integrationsschritt als Zwischenergebnis anfällt habe wir dort gleich noch eine zusätzliche Funktion namens „massenfluss“ eingebaut. Diese Vergleich den aktuellen Abstand des gerade betrachteten Testteilchens zur anderen Galaxie mit dem in einem Array gespeicherten bisherigen kleinsten Abstand. Sollte der jetzige Abstand kleiner sein, so wird dieser der neue kleinste Abstand und im Array gespeichert, welches am Ende der Berechnung in eine Datei ausgegeben wird. Die zweite optionale Aufgabe war die Berechnung des Massenverlustes. Hierzu muss einmal das statistische Gewicht der einzelnen Testteilchen ermittelt werden. Dies geschieht mit der Formel:

$$w_i = \frac{W_i}{\sum_{j=1}^N W_j}$$

$$W_i = \frac{e^{-r_{cen,i}/d} r_{cen,i} \Delta R_{Ring}}{N_{Ring}}$$

Die Normierung, also die Summe über alle Gewichte wird gleich mit der Initialisierung aller Variablen erledigt, während ein einzelnes Gewicht erst bei dem tatsächlichen Verlust des Teilchens berechnet wird. Dies geschieht in der Funktion „massenverlust“, welche in jedem Ausgabeintervall einmal aufgerufen wird. In dieser wird die Geschwindigkeit jedes Testteilchens, welches noch gebunden ist, im Ruhesystem seiner Galaxie errechnet. Sobald diese die Fluchtgeschwindigkeit überschreitet und somit folgende Ungleichung erfüllt:

$$2 \frac{G.M}{r_{cen}} < v_{Ruhesys_Galaxie}^2$$

kann es nicht mehr gebunden betrachtet werden. Dann werden der Zeitpunkt des Verlustes und das zum Teilchen gehörige statistische Gewicht in eine Datei ausgegeben. Es sei noch angemerkt, dass das Programm die für die Berechnung verwendeten Parameter immer in einer Datei speichert, sodass man weiß, was berechnet wurde, auch wenn man die Eingabedatei nicht benützt.

Auswertung

1. Teil: Testen und Effizienz des Programms

Im ersten Teil der Auswertung wurde das Unterprogramm, das die Bahnberechnung der Galaxien durchführt, getestet.

Für das Programm sollten problembezogene Einheiten verwendet werden, und zwar für die Gravitationskonstante $G \equiv 1$, als Masseneinheit $10^{11} M_{\odot}$ und als Längenmaß 1 kpc . Die Verwendung dieser Einheiten ergibt eine Systemzeiteinheit von $1.49 \cdot 10^6 \text{ yr}$. Dieser Zusammenhang sollte in der folgenden Berechnung bestätigt werden:

$$G = 6.6732 \cdot 10^{-11} [m]^3 [kg]^{-1} [s]^{-2} \quad (1) \quad G \equiv 1 [kpc]^3 [10^{11} M_{\odot}]^{-1} [t]^{-2}$$

$$1 [pc] = 3.086 \cdot 10^{16} [m] \quad (2) \quad 1 [m]^3 = \frac{1}{0.324} \cdot 10^{-57} [kpc]^3 \quad (2a)$$

$$1 [M_{\odot}] = 1.989 \cdot 10^{30} [kg] \quad (3) \quad 1 [kg]^{-1} = 1.989 \cdot 10^{-41} [10^{11} M_{\odot}]^{-1} \quad (3a)$$

Einsetzen der Beziehungen (2a) und (3a) in Gleichung (1) ergibt

$$G \equiv 1 [kpc]^3 [10^{11} M_{\odot}]^{-1} [t]^{-2} = 4.516 \cdot 10^{-28} [kpc]^3 [10^{11} M_{\odot}]^{-1} [s]^{-2} \quad (4)$$

$$1 [t]^{-2} = 4.516 \cdot 10^{-28} [s]^{-2} \quad (5)$$

$$1 [t]^2 = \frac{1}{4.516} \cdot 10^{28} [s]^2 \quad (6)$$

$$1 [t] = 0.471 \cdot 10^{14} [s] \quad (7)$$

$$[s] = \frac{1}{3.1536} \cdot 10^{-7} \text{ yr} \quad (8)$$

$$\boxed{1 [t] = 1.492 \cdot 10^6 [yr]} \quad (9)$$

Das Ergebnis der Umformungen in Gleichung (9) zeigt, dass bei Verwendung der angegebenen Systemeinheiten eine Zeiteinheit tatsächlich 1.49 Millionen Jahre beträgt.

Nach dieser einfachen Rechenaufgabe ging es an die Simulation der Galaxienbahnen. Dazu wurde ein Szenario aus zwei Galaxien mit jeweils $M = 10^{11} M_{\odot}$, einem Anfangsabstand von 200 kpc und einem minimalen Abstand von 25 kpc gewählt. Die bei dieser Begegnung entstehenden Bahnen sind in Abb. 1 dargestellt.

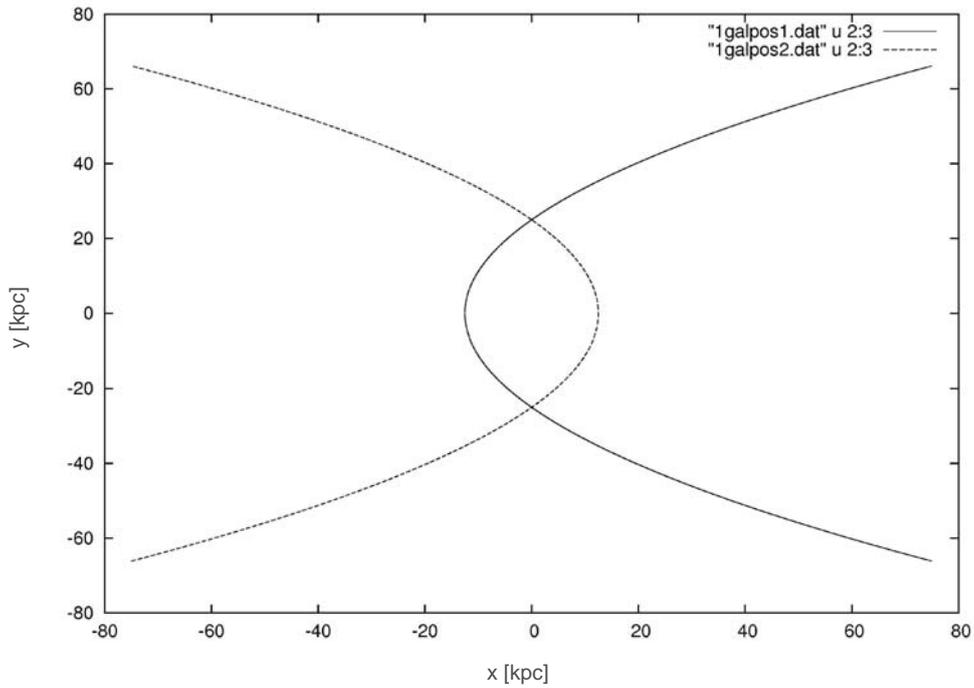


Abb. 1: Galaxienbahnen bei Begegnung zweier Galaxien mit gleicher Masse.

Vom Start (200 kpc voneinander entfernt), benötigen die beiden Galaxien bis zur Begegnung etwa 1642 Millionen Jahre. Dieses Resultat stimmt mit den Angaben sehr gut überein, daher können wir davon ausgehen dass unser Programm brauchbare Ergebnisse liefert.

Wenn die Masse einer der beiden Galaxien auf 10% reduziert wird, zeigen sich gravierende Unterschiede in der Form der Bahnen und in der Vorbeigangszeit. Die Bahnen dieser Begegnung sind in Abb. 2 zu sehen. Die Bahn der massereichen Galaxie (durchgehende Linie) wird nur wenig gestört, während die masseärmere Galaxie (gestrichelte Linie) bei der Begegnung sehr stark angezogen wird. Unter diesen Voraussetzungen beträgt die Zeit vom Start bis zum Erreichen des minimalen Abstands 2214 My.

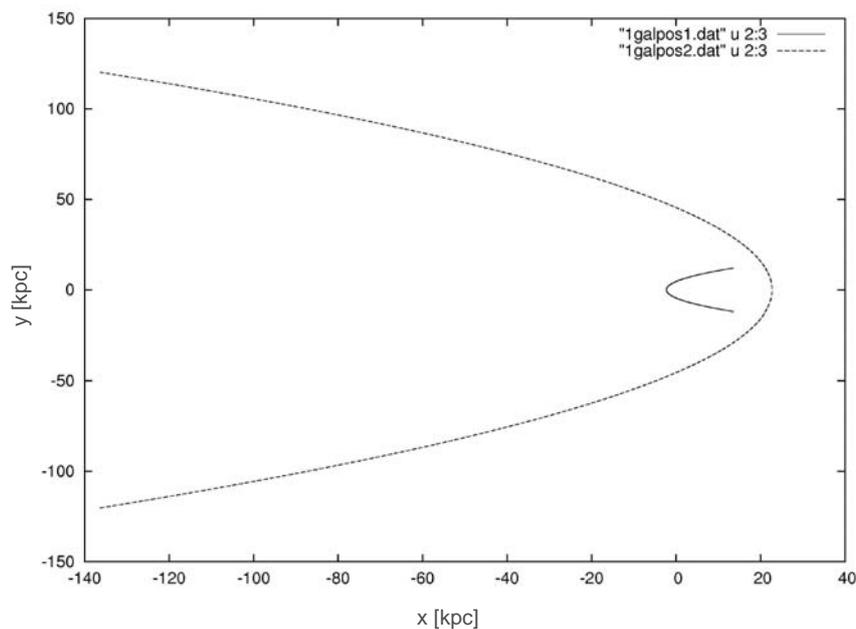


Abb. 2: Galaxienbahnen bei Begegnung zweier Galaxien mit Massenverhältnis 1:10

Um die Effizienz des Programms zu testen, haben wir die Gleichung

$$t = \frac{l^3}{2M_{red}k^2} \left(\tan\left(\frac{\theta}{2}\right) + \frac{1}{3} \tan^3\left(\frac{\theta}{2}\right) \right) \quad (10)$$

einmal direkt nach dem Winkel θ , und einmal nach $\tan(\theta/2)$ gelöst und im Programm implementiert. Es zeigt sich dass bei direkter Lösung die CPU-Zeit für das in Abb. 1 dargestellte Modell 0.7343 beträgt, im Gegensatz zu 0.8125 bei Lösung nach dem Tangens. Dieser Unterschied von etwa 10% veranlasste uns, für die weitere Berechnung den direkten Lösungsweg zu wählen.

Zuletzt wurde die Möglichkeit eines Zeitgewinns durch Optimierung beim Kompilieren getestet. Es zeigte sich, dass in unserem Fall (Verwendung des FTN95-Compilers für Windows von Salford) keine Verbesserung durch Optimierungsoptionen des Compilers auftrat. Die Zeitunterschiede bei mehrmaliger Durchführung derselben Berechnung erwiesen sich als nicht signifikant (siehe Tabelle 1).

Tabelle 1:

	CPU-Zeit	Optimierung
run 1	5.53125000000	nein
run 2	5.15625000000	ja
run 3	5.23437500000	nein
run 4	5.98437500000	ja
run 5	5.90625000000	nein
run 6	5.78125000000	ja

2. Simulation mit Testteilchen

Für die ersten Simulationen wurde folgendes Modell verwendet:

- 2 Galaxien mit einer Masse von je $10^{11} M_{\odot}$
- anfänglicher Abstand 200kpc
- Mindestabstand 25kpc
- 1200 Teilchen pro Galaxie
- 30 Ringe pro Galaxie
- 40 Testteilchen pro Ring
- Abstand der Ringe 0.5kpc

Es sollte pro run jeweils eine Galaxie in prograder und eine in retrograder Rotation gestartet werden. Da unser Programm aber nur gleichsinnige Rotation der beiden Galaxien vorsieht, wurde ein kleines Hilfsprogramm für die Auswertung geschrieben (*split.f95*, siehe Anhang). Dieses Hilfsprogramm liest aus den Ausgabefiles *outbo.asc* zweier runs mit prograder bzw. retrograder Rotation jeweils die Positionen der Testteilchen einer Galaxie, und fügt diese Daten in einem weiteren Ausgabefile *test.bin.asc* im richtigen Format für die Auswertung zusammen. Diese Vorgangsweise ist dadurch gerechtfertigt, dass die Teilchen um die Galaxien keine Masse besitzen und nur Testteilchen darstellen. Das heißt, die Bewegung der Testteilchen hängt nur von der Position und der Masse des Galaxienmittelpunkts ab, welche unabhängig von der Rotationsrichtung sind. Somit können die Daten der beiden Durchläufe

problemlos zusammengesetzt werden, solange die Eingabeparameter bis auf den Rotationssinn gleich sind.

Diese Vorgangsweise wurde bei allen folgenden Simulationen angewendet.

Die folgenden Abbildungen zeigen die Entwicklung der beiden Galaxien. Die Grafiken wurden mithilfe des Programms *GNUPlot* für Windows erstellt. Dazu haben wir die bereitgestellte Routine *multiplot.gnu* entsprechend der Parameter unserer Simulation modifiziert. Es mussten die Anzahl der Testteilchen, die gewünschten Bildnummern, und deren dazugehörige Zeitpunkte für jede Grafik einzeln manuell eingegeben werden. Das oben erwähnte Hilfsprogramm *split* erzeugt hierfür ein praktisches File *time.asc*, in dem man die zu einer Bildnummer gehörende Zeit ablesen kann.

Abb. 3 zeigt einen groben Überblick über den gesamten Simulationszeitraum. Die Bahn der Galaxien und ihrer Testteilchen ist deutlich zu erkennen. Zuerst bilden sich spiralförmige Features in beiden Galaxien aus, die sich mit geringer werdendem Abstand von der Galaxie abzulösen beginnen und expandieren. In Bild 4, zum Zeitpunkt $t = 142.4$ My, ist die untere Galaxie sehr gut in Form einer angedeuteten Balkenspirale zu sehen.

Abb. 3a zeigt eine zeitlich genauere Auflösung des Zeitpunkts der geringsten Distanz. Man kann in den Bildern 3-5 eine Materiebrücke zwischen den beiden Galaxien erkennen, die sich mit der Zeit ablöst und in eine Balkenspiralform der Klasse SBc übergeht.

Abb. 3b zeigt eine Momentaufnahme zum Zeitpunkt der größten Annäherung. Der Zeitpunkt ist aufgrund der diskreten Ausgabeschrittweite nicht genau 0. Man kann selbst hier bei größtmöglicher Störung noch ein bis 2 Ringe erkennen, woraus sich schließen lässt, dass bei den gegebenen Parametern eine Galaxie bis zu einem galaktozentrischen Abstand von etwa 0.5 bis 1 kpc nur gering durch die Wechselwirkung gestört wird.

Diese Grafik wurde mit der Routine *monoplot.gnu* erstellt, wobei wieder die Parameter an die Berechnung angepasst wurde.

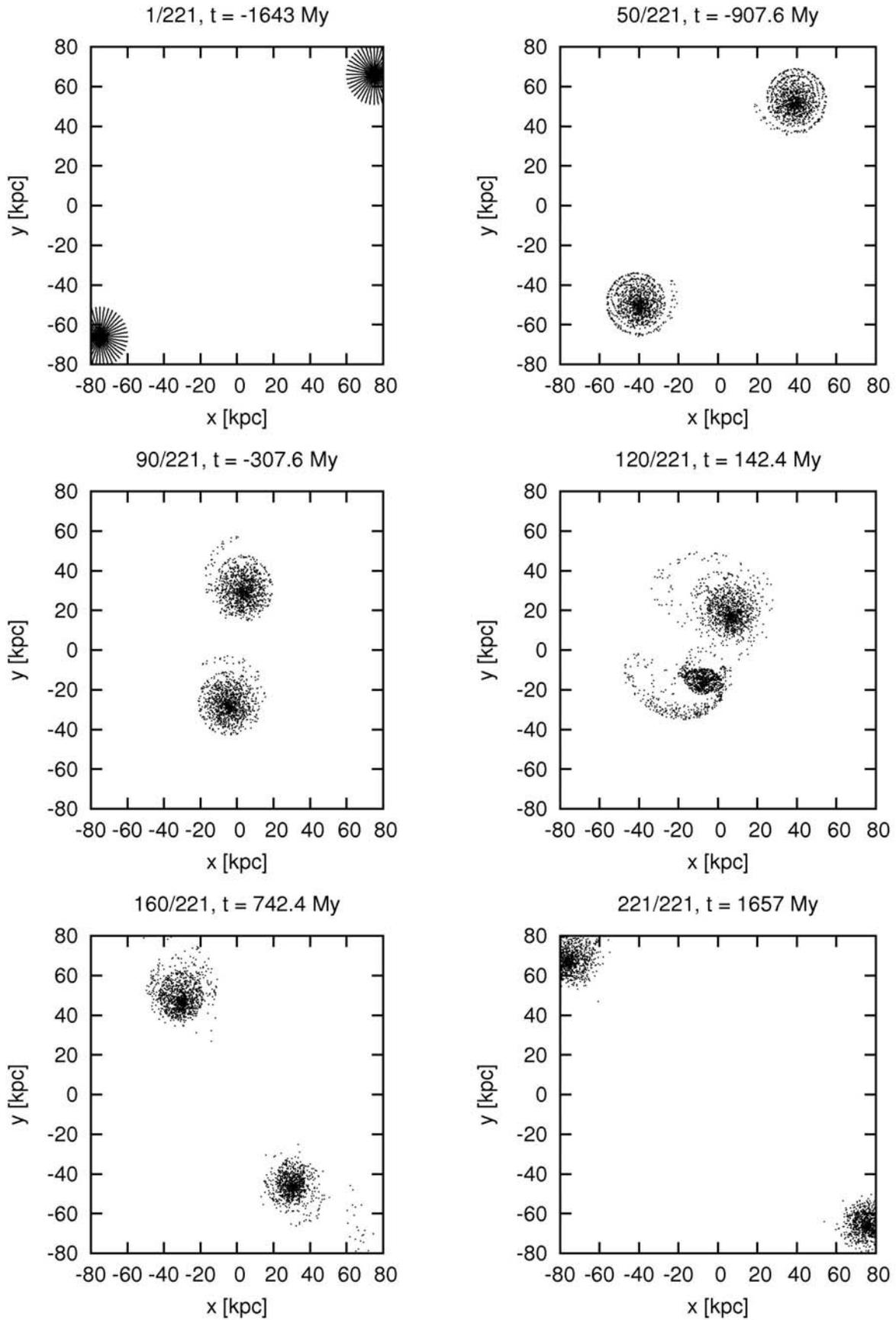


Abb. 3: Überblick über den gesamten Verlauf der Simulation

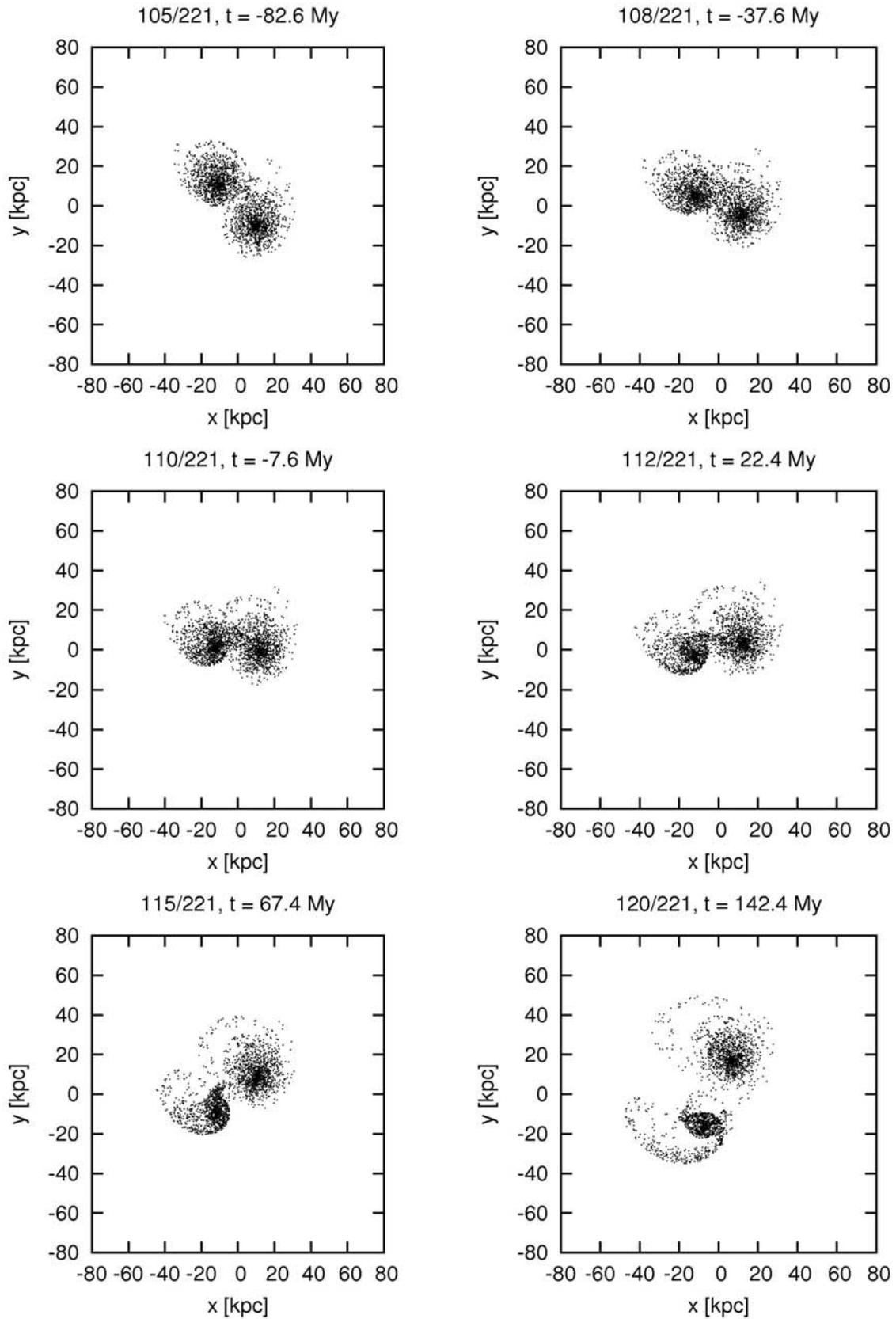


Abb. 3a: Details der Annäherung beider Galaxien

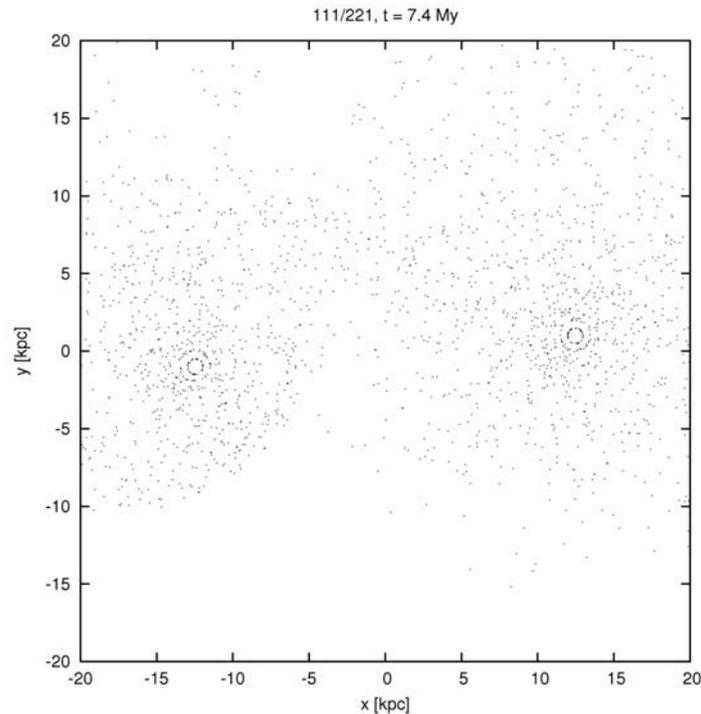


Abb. 3b: Position der Testteilchen zum Zeitpunkt der geringsten Distanz

Zusätzlich sollten wir herausfinden, wie sich eine Änderung des minimalen Abstands oder des Massenverhältnis um jeweils eine Größenordnung auf die Interaktion der Galaxien auswirken. Wir benutzten dieselben Eingabeparameter wie oben, mit der Ausnahme, dass einmal der Minimalabstand auf 2.5 kpc gesetzt und einmal die Masse einer Galaxie auf das Zehnfache erhöht wurde.

Bei dieser Berechnung wurden folgende Eingabeparameter verwendet:

- 2 Galaxien mit einer Masse von je $10^{11} M_{\odot}$
- anfänglicher Abstand 200kpc
- Mindestabstand 2.5kpc
- 1200 Teilchen pro Galaxie
- 30 Ringe pro Galaxie
- 40 Testteilchen pro Ring
- Abstand der Ringe 0.5kpc

In Abb. 4 ist der Verlauf der Bahnen zweier Galaxien mit gleicher Masse, aber auf 10% verringertem Mindestabstand zu sehen. Anfangs sind die Strukturen gleich wie bei der vorigen Simulation, bei zunehmender Annäherung zeigt sich jedoch, dass durch den kleineren Mindestabstand die Wechselwirkung wesentlich stärker ist, und sehr viel größere und stabilere Materiestrukturen entstehen.

Die Abbildungen 4a und 4b zeigen die Begegnung mit der Entstehung einer ausgedehnten, langlebigen Materiebrücke zwischen den Galaxien. Durch den sehr geringen Mindestabstand verschmelzen die beiden Galaxien fast vollständig bei der Begegnung, was zu einem starken Ausstoß von Materie führt.

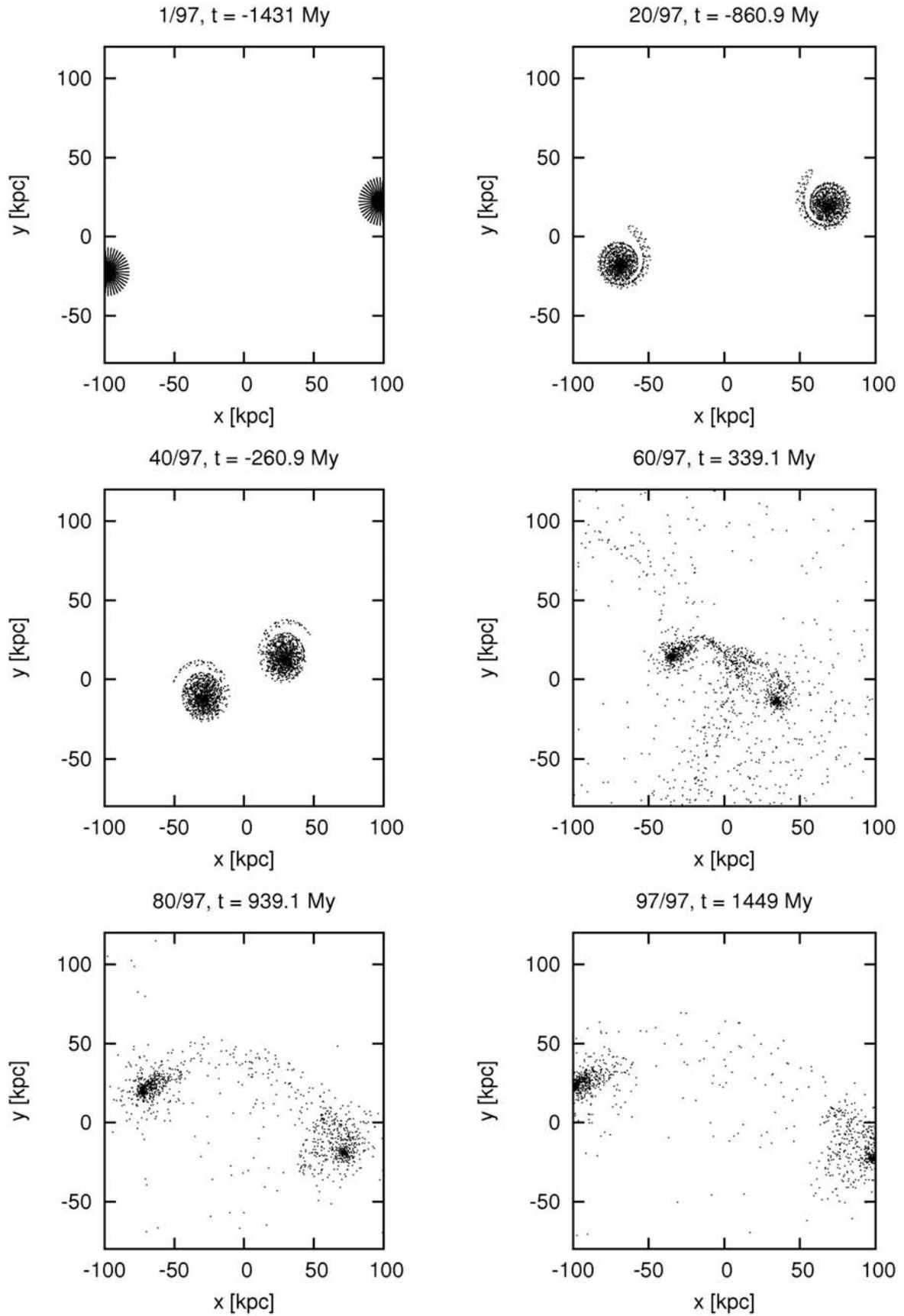


Abb. 4: Überblick über den gesamten Verlauf der Simulation

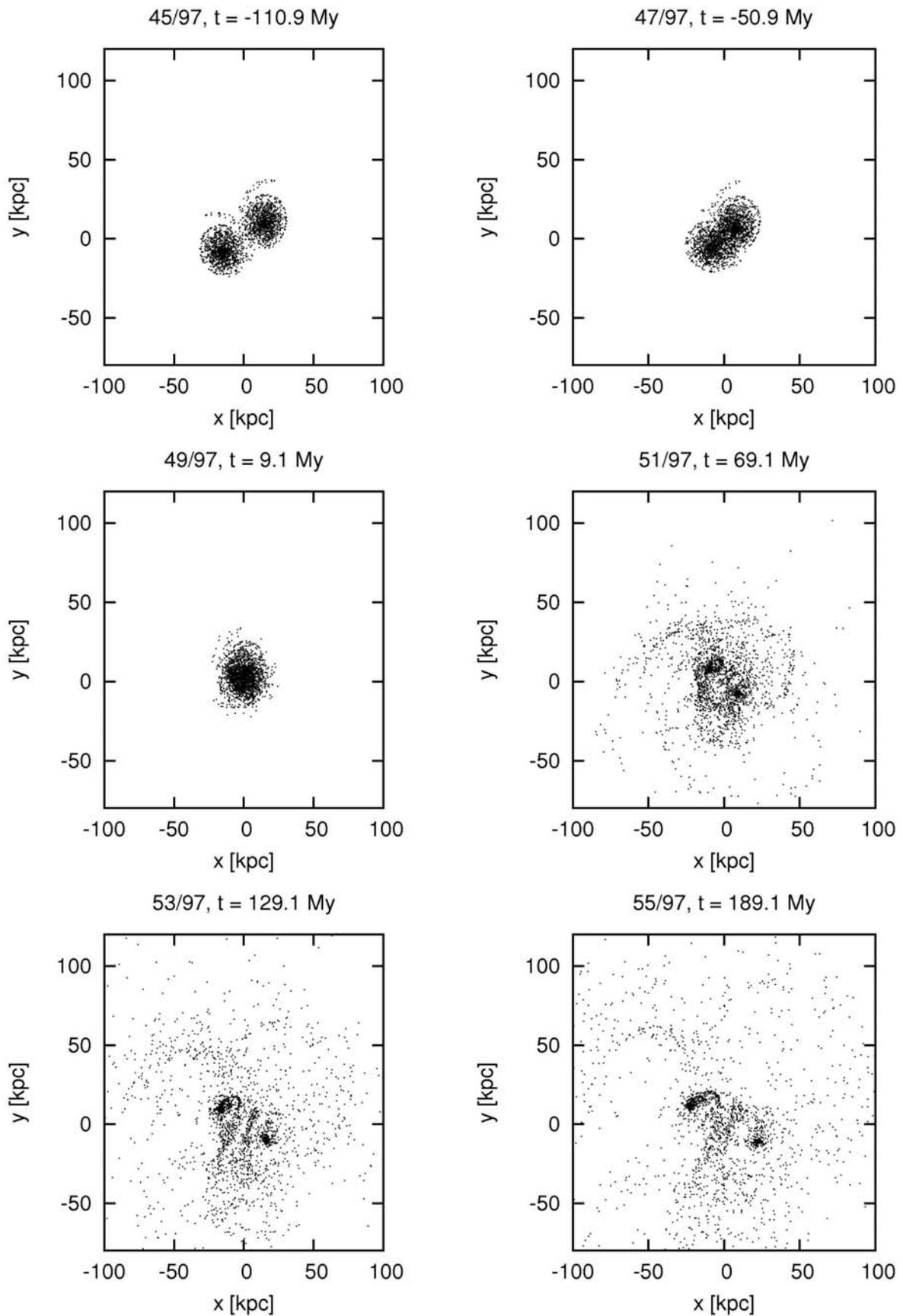


Abb. 4a: Details der Annäherung beider Galaxien (Teil 1)

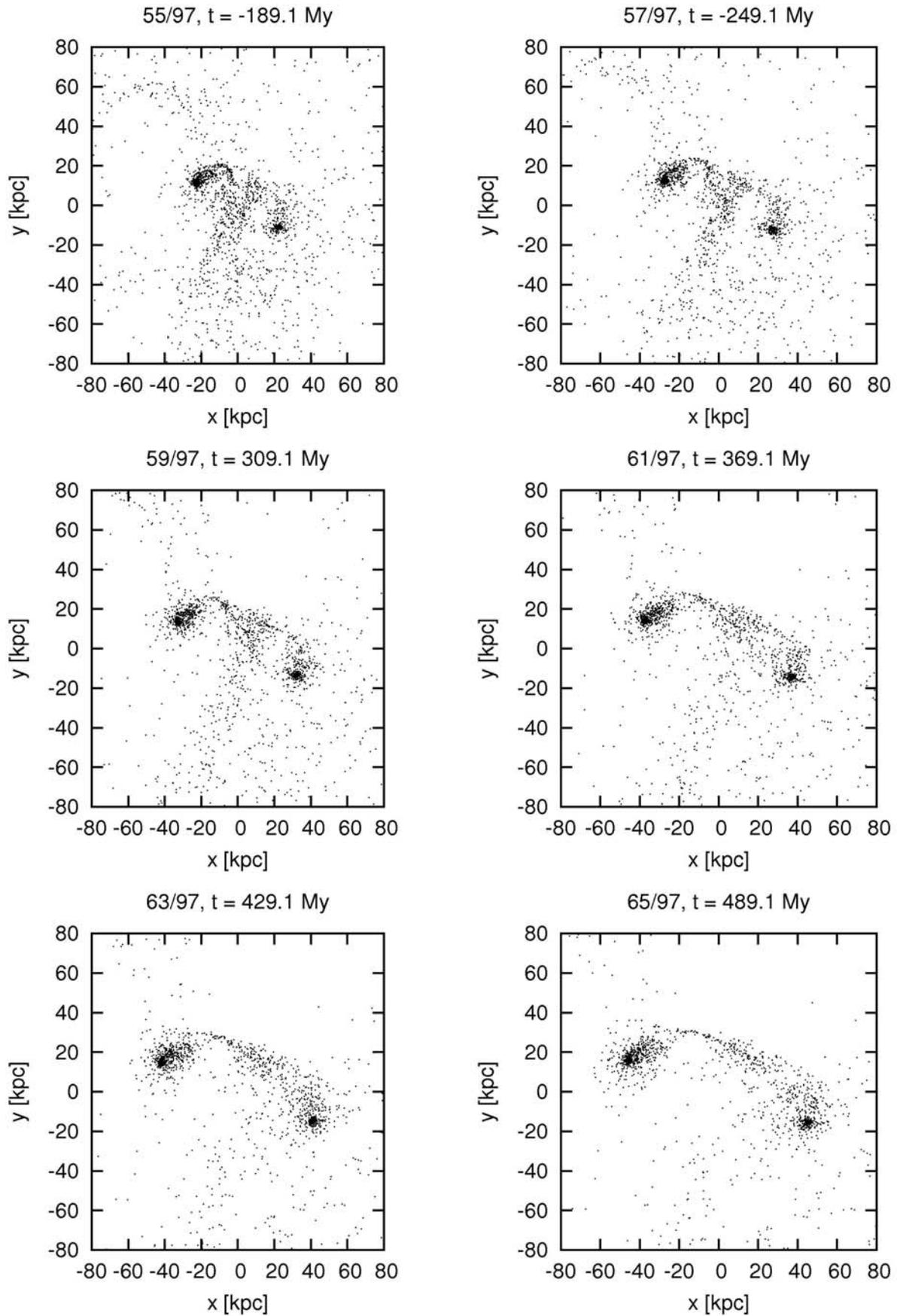


Abb. 4b: Details der Annäherung beider Galaxien (Teil 2)

Abb. 4c zeigt eine Momentaufnahme zum Zeitpunkt der geringsten Distanz. Obwohl der minimale Abstand um eine Größenordnung verringert wurde, bleibt ein Bereich von 0.5 kpc um beide Galaxien weitgehend ungestört, wie man an den ringförmigen Strukturen erkennen kann.

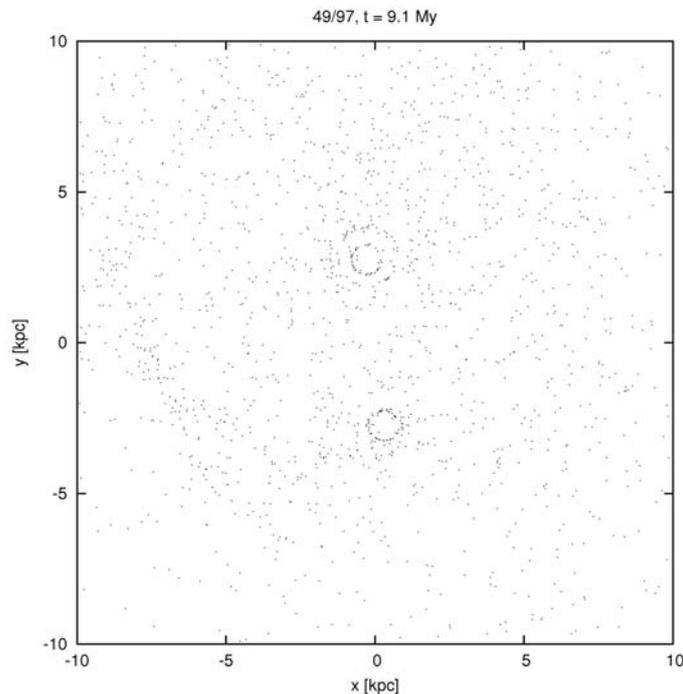


Abb. 4c: Position der Testteilchen zum Zeitpunkt der geringsten Distanz

Bei der zweiten Parameterstudie wurde der minimale Abstand wieder auf 25 kpc gesetzt, aber die Masse einer Galaxie auf das Zehnfache erhöht.

Die Eingabeparameter waren folgende:

- 1 Galaxie mit einer Masse von $10^{11} M_{\odot}$
- 1 Galaxie mit einer Masse von $10^{12} M_{\odot}$
- anfänglicher Abstand 200kpc
- Mindestabstand 25kpc
- 1200 Teilchen pro Galaxie
- 30 Ringe pro Galaxie
- 40 Testteilchen pro Ring
- Abstand der Ringe 0.5kpc

Abb. 5 zeigt wieder einen Überblick über die Wechselwirkung der beiden Galaxien. Im Vergleich zu den vorigen Simulationen musste hier der Maßstab deutlich erhöht werden, um beide Galaxien auf der Grafik darzustellen. Die massereiche Galaxie wird bei dieser Begegnung kaum gestört und bildet keine weiträumigen Strukturen aus. Erkennbar ist aber deutlich die Bildung von Spiralarms durch die Rotation der Testteilchenscheibe. Die massearme Galaxie wird durch die Wechselwirkung stark gestört und bildet einen hunderte kpc messenden Gezeitenarm aus, dessen Teilchen sich über einen sehr großen Bereich verteilen.

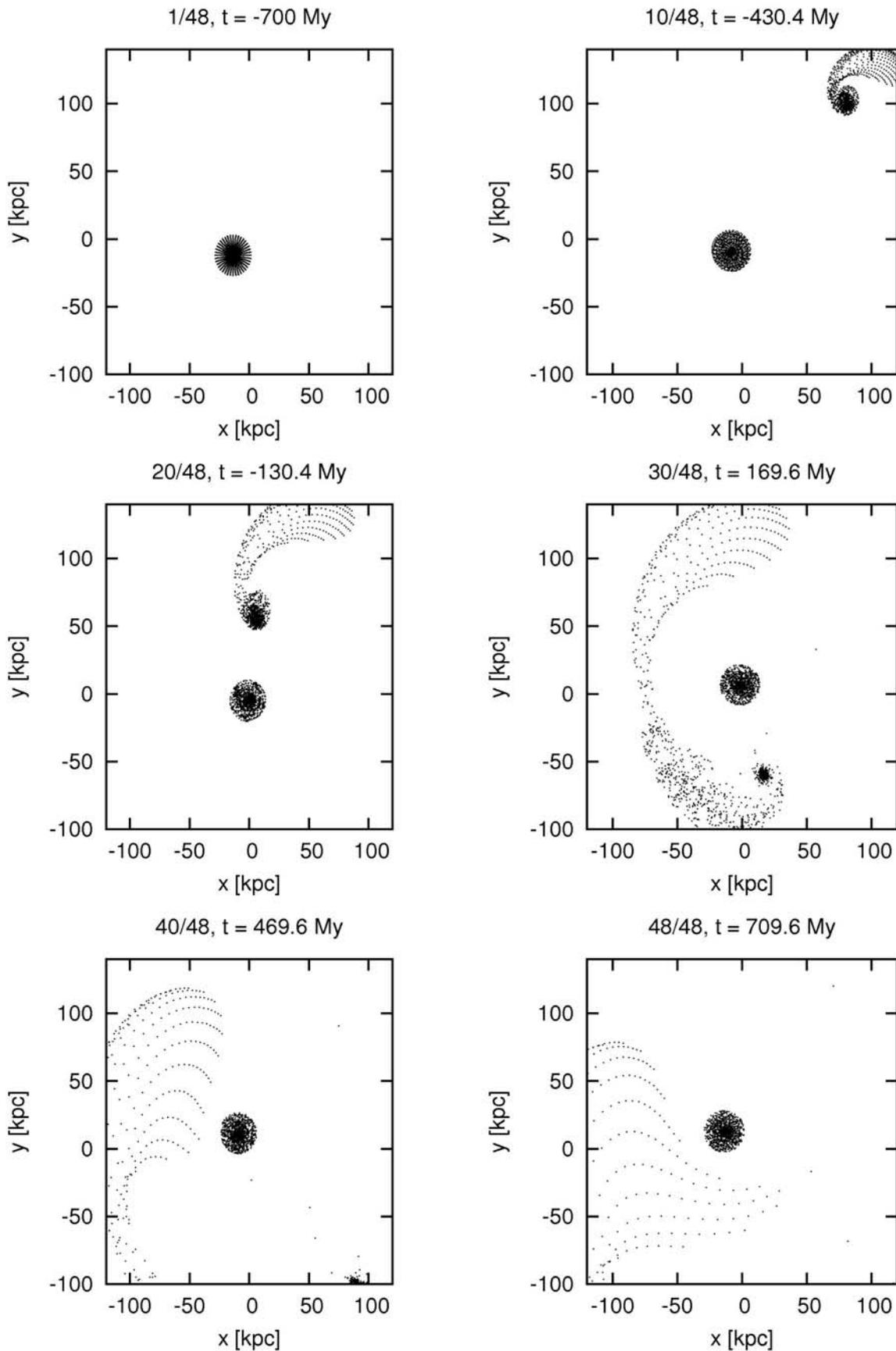


Abb. 5: Überblick über den gesamten Verlauf der Simulation

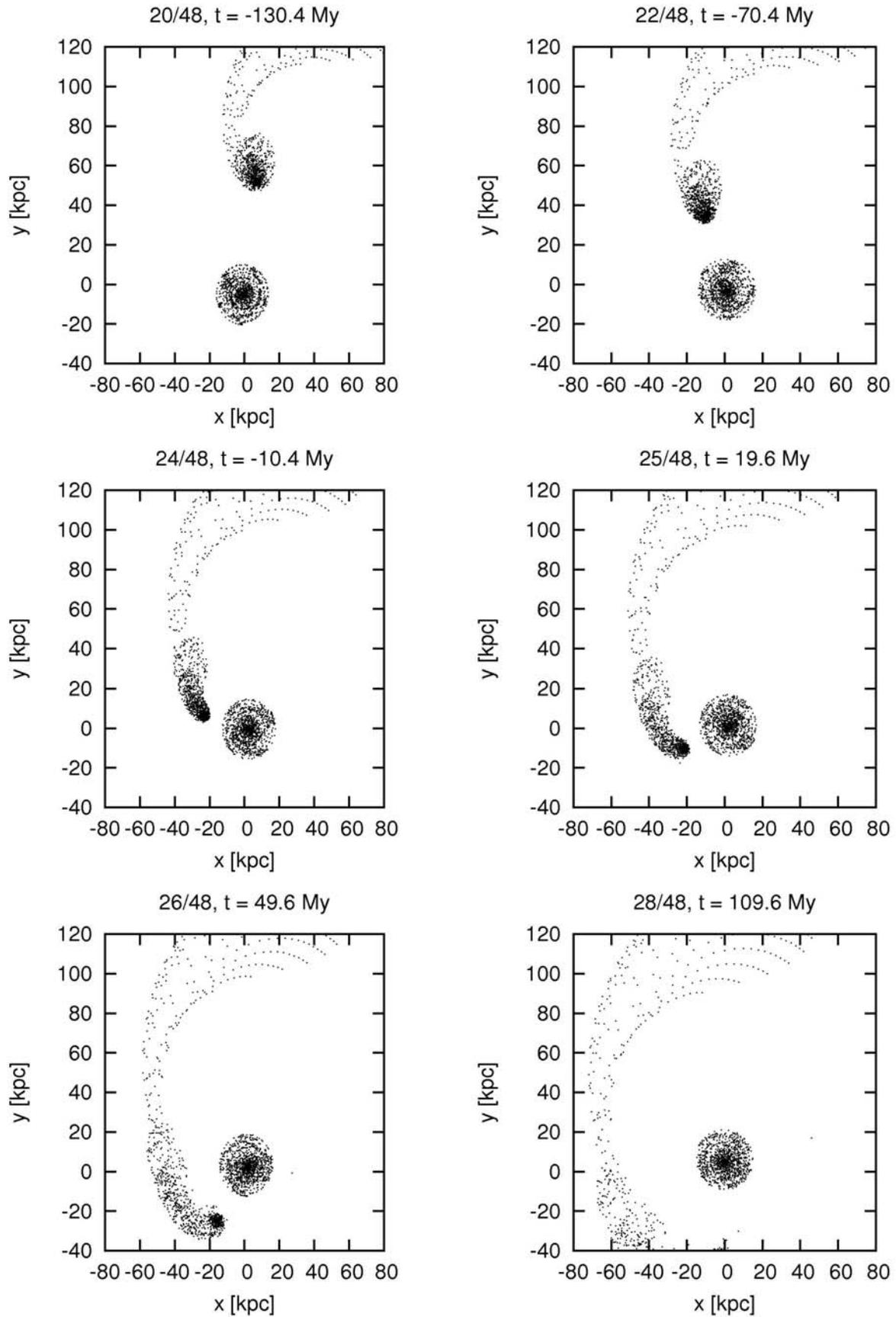


Abb. 5a: Details der Annäherung beider Galaxien

In Abb. 5a sind die Begegnung der Galaxien und die Entstehung des Gezeitenarms genauer zu sehen. Auch die spiralförmigen Strukturen der massereicheren Galaxie sind in dieser Abbildung gut zu erkennen.

Abb. 5b zeigt die Momentaufnahme zum Zeitpunkt der nächsten Begegnung, $t = 10.4$ My. Hier ist interessant, dass sogar im Kern der durch die Wechselwirkung sehr stark gestörten Galaxie ein Bereich von etwa 0.5 kpc relativ unbeeinflusst bleibt, wie an der kreisförmigen Struktur erkennbar ist. Die massereiche Galaxie bleibt hingegen bis zu einem Bereich von 2.5 bis 3 kpc stabil.

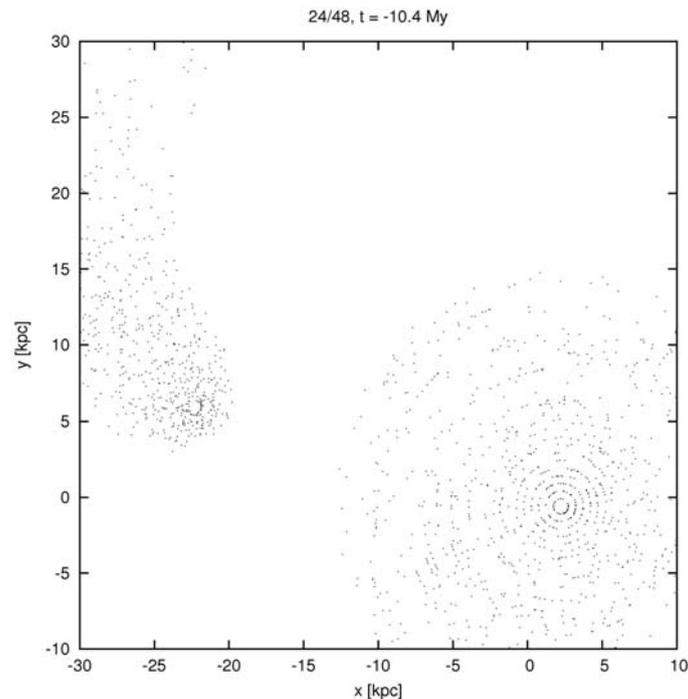


Abb. 5b: Position der Testteilchen zum Zeitpunkt der geringsten Distanz

3. Massenfluss

Die letzte (optionale) Aufgabe war die Berechnung und Darstellung des Massenflusses einer Galaxie. Die Ausgangsparameter waren folgende:

- 2 Galaxien mit jeweils $10^{11} M_{\odot}$
- 1000 Testteilchen
- Minimalabstand 10 kpc
- Skalenlänge 5kpc
-

Es wurden fünf verschiedene Szenarien simuliert:

- prograde Rotation
- retrograde Rotation
- Massenverhältnis von 10:1
- Massenverhältnis von 1:10
- Scheibe um 45° gedreht gegenüber der Bahnebene

Die Abbildungen 6 bis 10 zeigen den zeitlichen Verlauf des Massenverlustes grafisch mit einem Balkendiagramm. Der Massenverlust ist in dimensionslosen Größen als Bruchteil der Gesamtmasse angegeben.

Der größte Massenverlust tritt naturgemäß bei einem Massenverhältnis von 1:10 auf. Hier verliert die Galaxie etwa 99% ihrer Testteilchen, und zwar hauptsächlich schon vor dem Zusammentreffen mit der massereichen Galaxie.

Der geringste Massenverlust ist dementsprechend bei einem Massenverhältnis von 10:1 zu finden. Die massereiche Galaxie wird nur wenig gestört, und verliert nur ca. 30% ihrer Testpartikel, wobei der Verlust relativ kurz um den Zeitpunkt der geringsten Distanz auftritt.

Interessanterweise ist ein deutlicher Unterschied zwischen dem Massenverlust bei prograder und retrograder Rotation festzustellen. Dies könnte sich dadurch erklären lassen, dass bei retrograder Rotation (der Bahnbewegung entgegengesetzt) die Testteilchen geringere Geschwindigkeiten erreichen, und so weniger Teilchen ungebunden werden. Im Gegensatz dazu addieren sich bei der prograden Rotation die Geschwindigkeiten der Teilchen und die der gesamten Galaxie und erreichen dadurch eher Fluchtgeschwindigkeiten.

Eine Abhängigkeit des Massenverlusts von der Lage der Scheibe im Raum lässt sich aus unseren Berechnungen nicht ableiten.

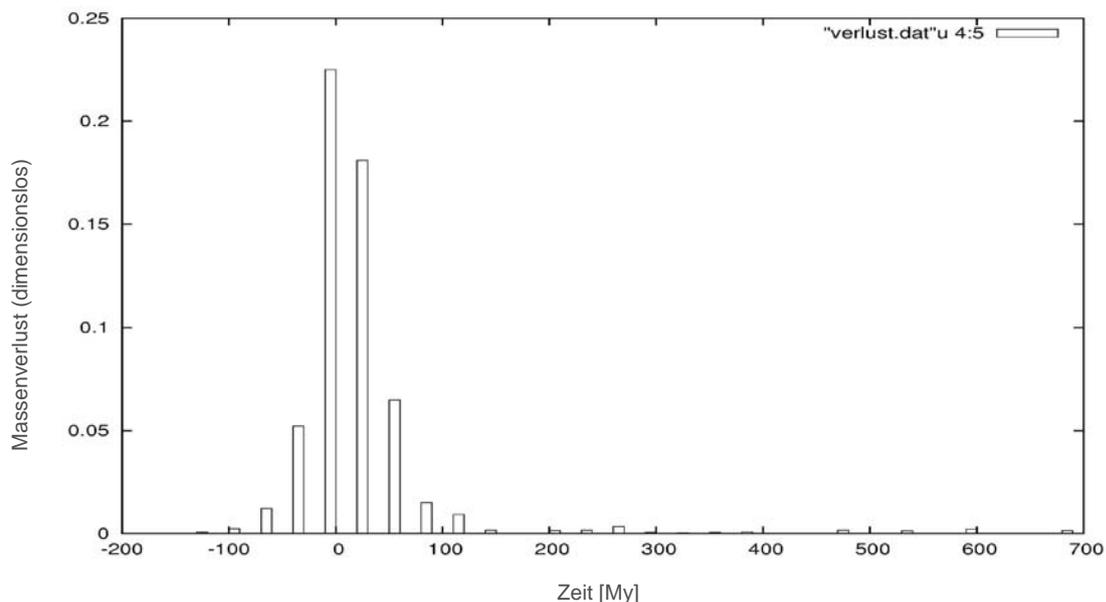


Abb. 6: zeitlicher Verlauf des Massenverlusts bei prograder Rotation

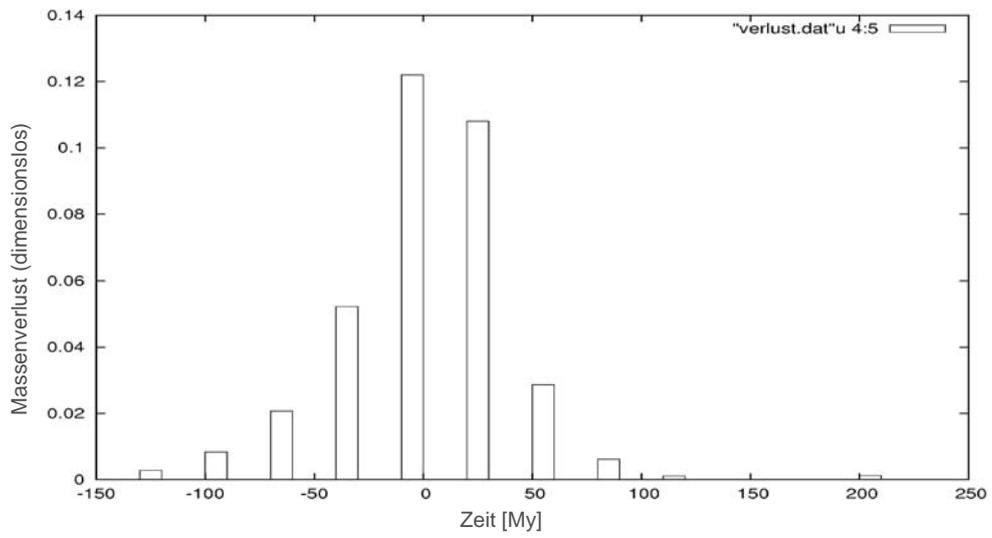


Abb. 7: zeitlicher Verlauf des Massenverlusts bei retrograder Rotation

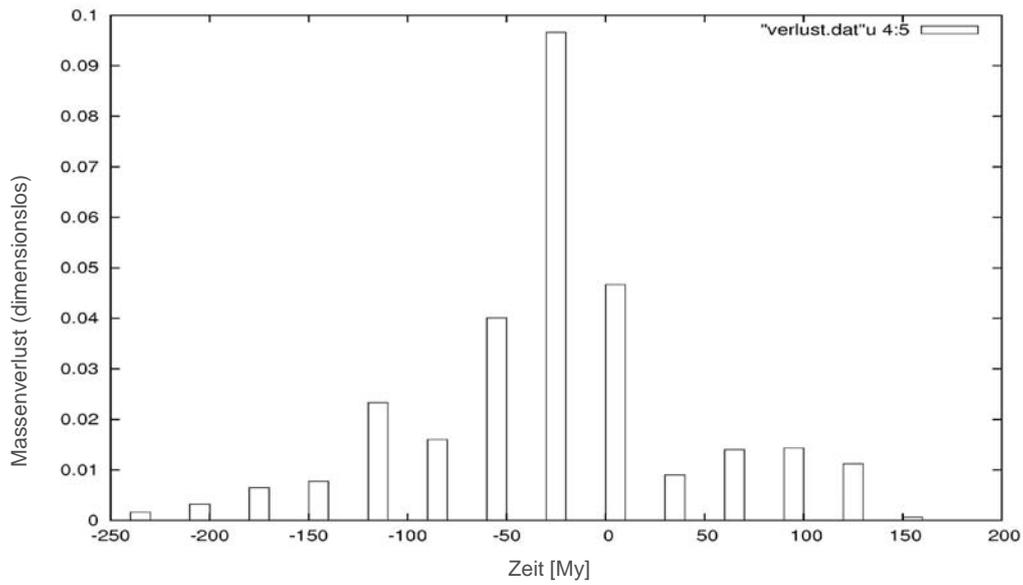


Abb. 8: zeitlicher Verlauf des Massenverlusts bei einem Massenverhältnis von 10:1

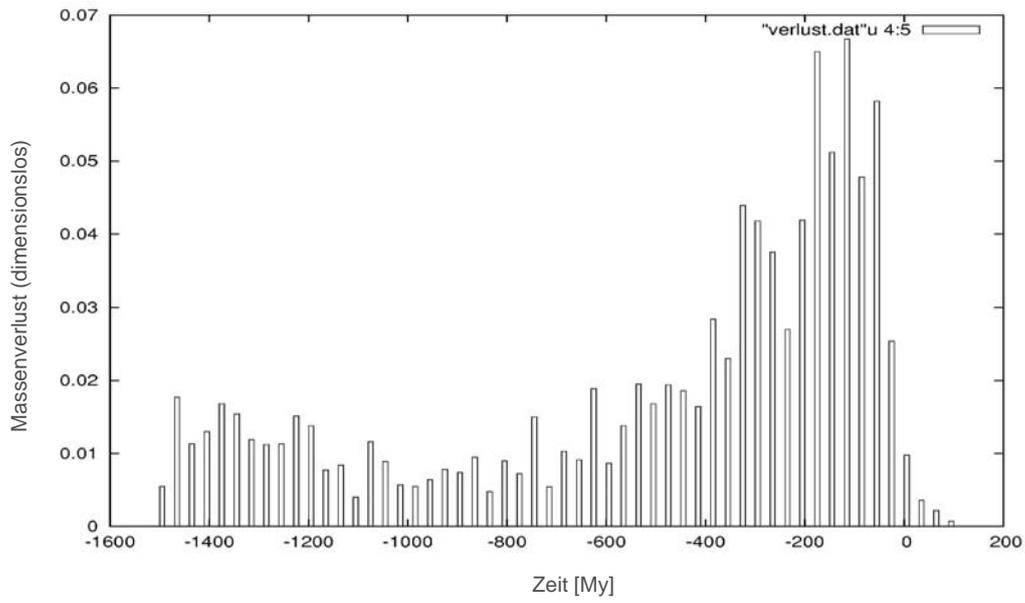


Abb. 9: zeitlicher Verlauf des Massenverlusts bei einem Massenverhältnis von 1:10

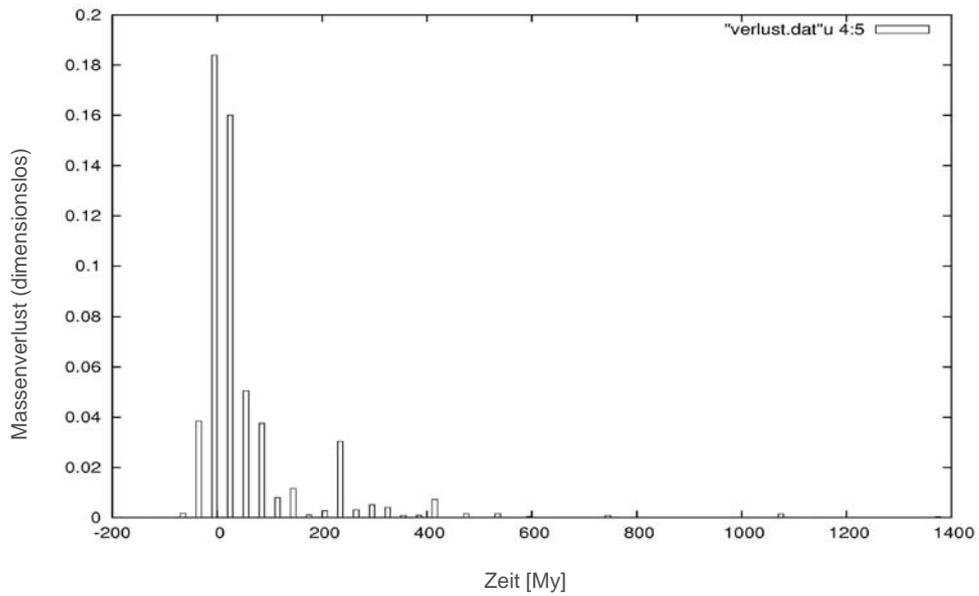


Abb. 10: zeitlicher Verlauf des Massenverlusts bei Drehung der Scheibenebene um 45°

Tabelle 2:

Simulation	Massenverlust gesamt
Prograd	0.5796
Retrograd	0.3512
10:1	0.2909
1:10	0.9926
Drehung	0.5537