

Paralleler CFK-Baumaufbau

Kontrollierte Versuchsserie I-013 | 18. September 2026

18. September 2026

Inhaltsverzeichnis

1 Zusammenfassung	2
1.1 Kernaussage der Korrektheitskontrolle	2
1.2 Abgrenzung	2
1.3 Groesse der tatsaechlichen Aufgaben	2
1.4 Wichtigstes Leistungsergebnis	2
2 Verfahren und Kontrollen	3
2.1 Zeitmessung	3
3 Skalierbarkeit des gesamten Aufbaus	4
4 Wo die Zeit verbleibt	5
5 Bewegung und nichtuniforme Tiefe	6
6 Beurteilung und naechster Schritt	7
6.1 Empfehlung	7
6.2 Grenzen	7
6.3 Reproduzierbarkeit und Verantwortung	7

Fragestellung: Kann der bisher serielle Aufbau der Teilungsanforderungen und des konformen Abschlusses beschleunigt werden, ohne die resultierenden Gitter zu veraendern? Dieser Bericht dokumentiert einen ersten optionalen C++-Prototyp und eine vorab festgelegte Serie auf zwei Rechnern. Die Arbeit 0.3 bleibt unveraendert.

Rechner	Hardware	Abschluss / Umfang
Dreihemden	Ryzen 5 7600, 6 Kerne / 12 Threads, GCC 13.3	complete; 132 Prozesse, 618 Messzustaeude, 8.2 min inkl. Kontrollen
Schmalzberg	Core i7-8565U, 4 Kerne / 8 Threads, GCC 11.4	complete; 114 Prozesse, 564 Messzustaeude, 15.8 min inkl. Kontrollen

1 Zusammenfassung

1.1 Kernaussage der Korrektheitskontrolle

Alle als erfolgreich archivierten Messzustaeude wurden durch vollstaendige Vektorvergleiche mit einem erneut berechneten seriellen Referenzgitter kontrolliert. Verglichen wurden Knoten, notwendige Teilungen, Teilchenbesitzer und Tiefenhistogramme; die Konformitaet wurde separat geprueft. Rechneruebergreifend stimmen die Diagnose-Hashes fuer 174 gemeinsame Zustaeude ueberein. Hashes sind keine unabhaengige mathematische Validierung.

1.2 Abgrenzung

Dies sind bewegte Geometrie-Benchmarks, keine selbstgravitierenden Simulationen. Vorgegebene glatte Bewegung vermeidet instabile Physik, erzeugt aber wechselnde, stark nichtuniforme Gitter. Der gesamte physikalische Zeitschritt mit Kraftberechnung und Integration wurde hier nicht vermessen.

1.3 Groesse der tatsaechlichen Aufgaben

Dreihemden: bis 2 083 571 Baumknoten maximale Blatttiefe 50; maximaler Prozess-RSS 0.24 GiB einschliesslich Referenzkontrolle.

Schmalzberg: bis 2 083 571 Baumknoten maximale Blatttiefe 50; maximaler Prozess-RSS 0.22 GiB einschliesslich Referenzkontrolle.

1.4 Wichtigstes Leistungsergebnis

Gegenueber dem bereits teilweise parallelen Referenzpfad liegen die Median-Speedups bei 0.96 bis 1.04. Damit ist noch kein allgemeiner Zusatzgewinn belegt. Die schnellere Abschlussphase wird weitgehend durch das serielle Zusammenfuehren aufgewogen. Gegen einen einzelnen Thread sieht die Gesamtbeschleunigung groesser aus; sie darf nicht allein diesem neuen Eingriff zugerechnet werden.

2 Verfahren und Kontrollen

Der Parallelpfad erzeugt zunaechst eine grobe Praefixfront bis Tiefe 6. Jede Aufgabe bearbeitet einen disjunkten Koordinatenbereich. Sie berechnet notwendige Teilungen und schliesst diese global unter Vorfahren und Hypotenusenpartnern ab. Erst danach werden private Teilungsmengen vereinigt. Blaetter werden nicht unabhaengig zusammengefuegt. Die bisherige Referenz ist weiterhin der Standardpfad.

Serie	Festlegung
Skalierung	100 000 / 300 000 Teilchen; drei Verteilungen; drei Seeds; drei Messframes nach einem Aufwaermframe.
Kontrollvarianten	Referenz mit 1 und allen physischen Kernen; neuer Pfad mit 1, 2, 4, allen physischen Kernen und SMT.
Bewegte Folge	40 aufeinanderfolgende Neuaufbauten, 100 000 Teilchen in vier Gruppen; drei Seeds; Referenz 1 gegen neuen Pfad mit physischen Kernen.
Reihenfolge	Reproduzierbar gemischt innerhalb gepaarter Bloecke; in der bewegten Folge wechselnde Reihenfolge.
Begrenzung	40 Minuten Budget pro Rechner; 240 Sekunden pro Prozess. Keine automatische Wiederholung fehlgeschlagener Messprozesse.

2.1 Zeitmessung

Monotone Wandzeit umfasst den vollstaendigen `build_mesh`-Aufruf. Eingabeerzeugung, Ausgabe und Referenzkontrolle liegen ausserhalb. Packing ist Bestandteil des Aufbaus. Phasen werden getrennt gemessen; die Differenz zur Gesamtzeit enthaelt unter anderem Speicherfreigaben. Aufwaermung ist ausgeschlossen, nicht nachtraeglich herausgerechnet.

Drei Seeds sind die Replikate. Frames desselben Laufs sind abhaengig. Fuer Skalierung werden zunaechst die drei Frames je Lauf gemittelt, dann gepaarte Speedups je Seed berechnet. Dargestellt sind Median und gesamte Spanne dieser drei Werte, keine Konfidenzintervalle.

Lokale Kontrollen: alle fuenf regulaeren CTest-Programme bestanden; Gittertests auch ohne OpenMP sowie unter ASan/UBSan bestanden. LeakSanitizer ist in der ueberwachten Umgebung nicht nutzbar; Leckpruefung deaktiviert. Kein ThreadSanitizer-Nachweis. Auf beiden Zielrechnern gingen erfolgreiche Gittertests der Serie voraus.

3 Skalierbarkeit des gesamten Aufbaus

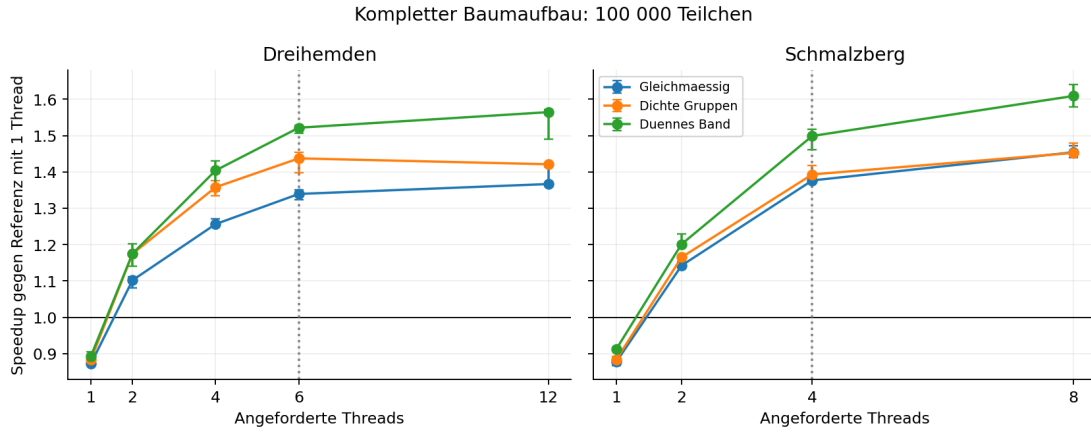


Abbildung 1: Skalierung des gesamten Baumaufbaus mit 100000 Teilchen.

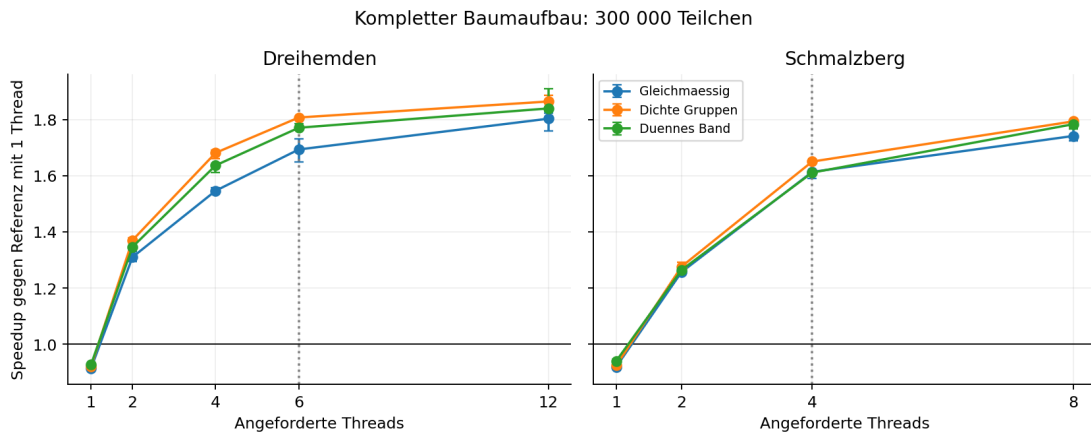


Abbildung 2: Skalierung des gesamten Baumaufbaus mit 300000 Teilchen.

Speedup > 1 bedeutet schneller als die Referenz mit einem Thread; < 1 bedeutet langsamer. Die senkrechte gepunktete Linie markiert die Zahl physischer Kerne. Rechts davon werden SMT-Threads genutzt. Die Kurve bei einem Thread zeigt den organisatorischen Mehrbedarf des neuen Verfahrens. Ideale lineare Skalierung wird wegen serieller Teilphasen nicht erwartet. Absolute Zeiten beider Rechner enthalten auch Compilerunterschiede.

4 Wo die Zeit verbleibt

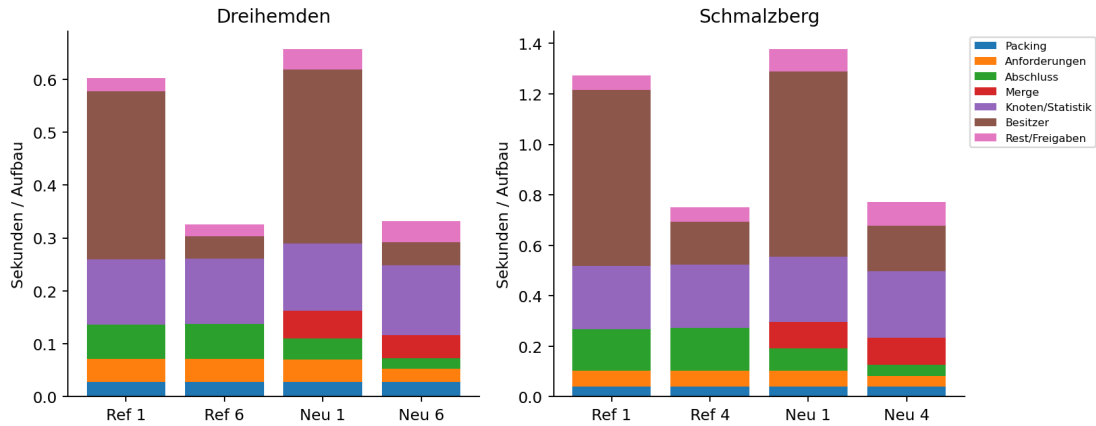


Abbildung 3: Getrennte Aufbauphasen fuer 300000 Teilchen in dichten Gruppen.

Phasenmedian pro Variante fuer 300 000 Teilchen in dichten Gruppen. Die Summe von Phasenmedianen ist nicht notwendig exakt der Median der Gesamtzeit. Ref mit mehreren Threads parallelisiert nur die Besitzerzuordnung; damit laesst sich ein Gewinn durch den neuen Aufbau von bereits vorhandener Parallelitaet unterscheiden.

Rechner	Fall, N=300 000	Speedup / Ref 1	Speedup / Ref p
Dreihemden	Gleichmaessig	1.69	1.02 (0.98-1.02)
Dreihemden	Dichte Gruppen	1.81	0.98 (0.97-0.98)
Dreihemden	Duennes Band	1.77	1.02 (1.00-1.02)
Schmalzberg	Gleichmaessig	1.61	1.03 (1.02-1.03)
Schmalzberg	Dichte Gruppen	1.65	0.98 (0.97-0.98)
Schmalzberg	Duennes Band	1.61	1.00 (0.99-1.00)

Entscheidende Kontrolle: Ref p verwendet bereits p physische Kerne fuer die Besitzerzuordnung. Nur ein Speedup ueber 1 in der letzten Spalte ist ein Zusatzgewinn des neuen Aufbaupfades gegen diesen vorhandenen Stand. Die Spanne umfasst drei gepaarte Seeds. Ein Gewinn allein gegen Ref 1 darf nicht vollstaendig der neuen Parallelisierung zugerechnet werden.

Die Praefixfront ist fest und noch nicht lastbalanciert. Ein enger Cluster kann fast vollstaendig in einer Aufgabe liegen. Private Abschluesse erzeugen Mehrfacharbeit; das Merge und das Sortieren/Materialisieren bleiben seriell. Deshalb ist die Zahl beschaeftigter Threads allein kein Erfolgsnachweis.

5 Bewegung und nichtuniforme Tiefe

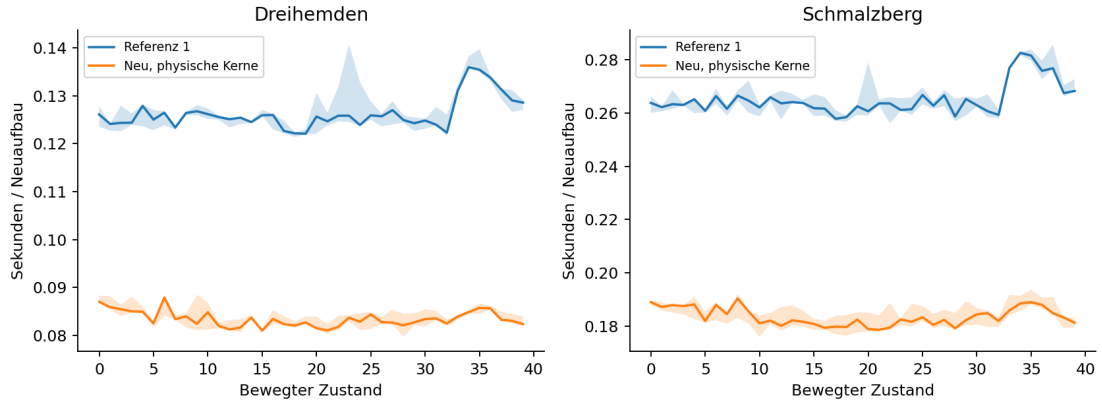


Abbildung 4: Wiederholter Aufbau entlang der vorgegebenen Bewegung.

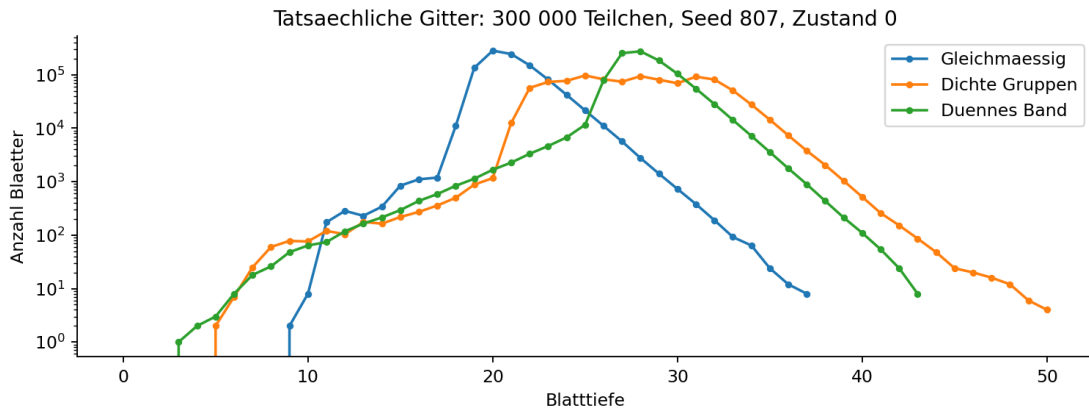


Abbildung 5: Tatsaechliche Verteilung der Blattzahlen ueber die Baumtiefe.

Oben: Median der drei Seeds pro bewegtem Zustand, Band = Minimum bis Maximum. Pro Zustand wird neu aufgebaut, keine Wiederverwendung eines alten Gitters. Die externe Referenzkontrolle unterbricht die reine Aufbaufolge; dies ist kein ununterbrochener Produktionslauf. Unten: tatsaechliche Blattzahlen nach Tiefe, logarithmische Ordinate. Die uniforme Teilchenkontrolle erzeugt ebenfalls kein uniformes Gitter, da zufaellige lokale Teilchenabstaende variieren.

6 Beurteilung und naechster Schritt

Dreihemden: In der bewegten 40-Zustandsfolge liegt der gepaarte Speedup bei 1.51, Spanne 1.51-1.52. Das ist ein Aufbau-Speedup, kein Speedup einer Hydorrechnung.

Schmalzberg: In der bewegten 40-Zustandsfolge liegt der gepaarte Speedup bei 1.45, Spanne 1.43-1.46. Das ist ein Aufbau-Speedup, kein Speedup einer Hydorrechnung.

6.1 Empfehlung

Dreihemden, dichte Gruppen mit 300 000 Teilchen: Die Abschlussphase kostet im Phasenmedian 65.4 ms in Ref p und 20.0 ms im neuen Pfad. Dazu kommen dort 43.2 ms fuer das Merge. Das erklart, warum die beschleunigte Teilphase nicht automatisch einen schnelleren Gesamtaufbau ergibt.

Schmalzberg, dichte Gruppen mit 300 000 Teilchen: Die Abschlussphase kostet im Phasenmedian 169.2 ms in Ref p und 42.6 ms im neuen Pfad. Dazu kommen dort 108.5 ms fuer das Merge. Das erklart, warum die beschleunigte Teilphase nicht automatisch einen schnelleren Gesamtaufbau ergibt.

Den neuen Modus vorerst optional belassen. Die erste Serie entscheidet nicht ueber eine allgemeine Ueberlegenheit, sondern lokalisiert Kosten und Lastverteilung. Vor einer Standardumschaltung muessen Gewinne gegen die bereits teilweise parallele Referenz stabil sein. Als naechste technische Kandidaten kommt zuerst eine effizientere Vereinigung/Materialisierung infrage, danach eine besser lastbalancierte Praefixfront. Danach dieselben Kontrollfaelle erneut verwenden und einen bewaehrten physikalischen Anwendungslauf ergaenzen.

6.2 Grenzen

Drei Seeds erlauben nur eine erste Streuungsbeurteilung. CPU-Frequenz, Temperatur und fremde Last wurden nicht kontinuierlich aufgezeichnet; die Rechner waren bei der Vorpruefung wenig belastet. Keine NUMA-Studie, kein Vergleich mit fremden AMR-Bibliotheken und kein erneuter vollstaendiger Python-Referenzabgleich. Maximaler RSS umfasst auch den zur Kontrolle gleichzeitig gehaltenen Referenzbaum und ist daher kein isolierter Speicherbedarf des Parallelalgorithmus.

6.3 Reproduzierbarkeit und Verantwortung

Archiviert sind Rohmessungen, Compiler/Flags, Binaerdateien, Quellen und Pruefsummen. Einstieg: `CPP/docs/closure_study.md`; Programme: `mesh_study.cpp`, `closure_study.py`, `run_closure_study.sh` und `report_closure_study.py`. Der direkte Build benoetigte anfangs eine nachgetragene `CFK_INDEX_RESERVE_FACTOR`-Definition; dabei wurden noch keine Messdaten erzeugt. Versuchsziel und Rechnerfreigabe stammen von Pascal Bauer, konkreter Prototyp, Matrix und Auswertung wurden von ChatGPT ausgearbeitet. Dieser Bericht ist keine unabhengige Begutachtung.