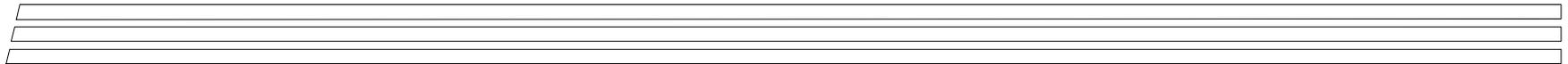


## 6. *Der OpenMP Standard*

- **Direktiven-basiertes API zur Programmierung von Parallelrechnern mit gemeinsamem Speicher**
- **für FORTRAN, C und C++**



# OpenMP Programmiermodell

- OpenMP Direktiven basieren in C and C++ auf `#pragma` Compilerdirektiven.

- Eine Direktive besteht aus einem Namen und einer Klauselliste:  
`#pragma omp directive [clause list]`

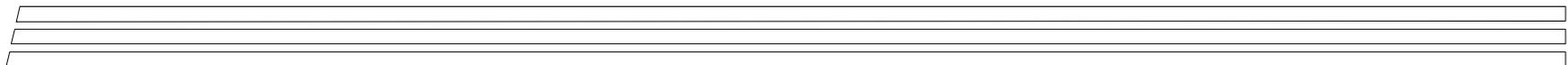
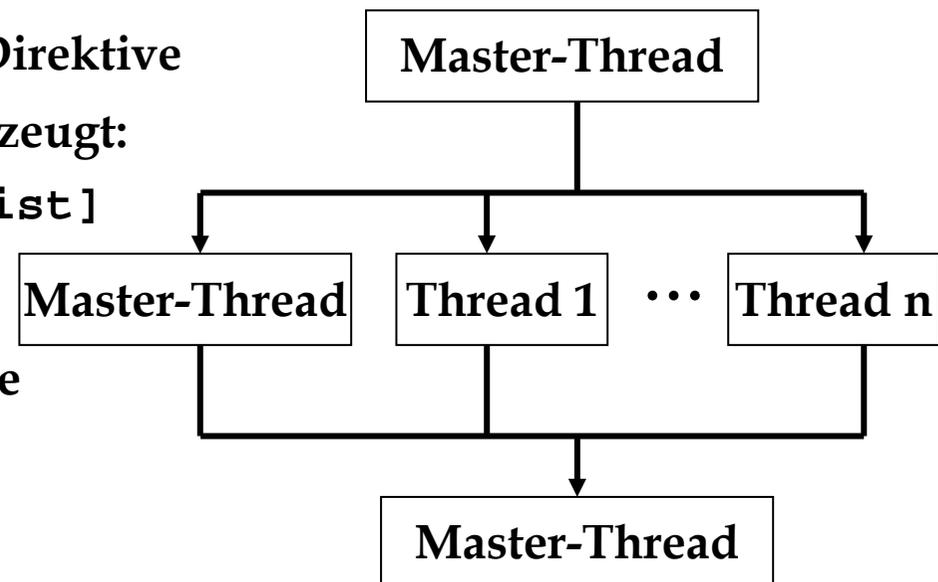
- OpenMP Programme werden sequentiell ausgeführt, bis sie auf eine `parallel` Direktive stoßen, die eine Gruppe von Threads erzeugt:

```
#pragma omp parallel [clause list]
```

```
/* structured block */
```

- Der Thread, der die `parallel` Direktive ausführt, wird zum *Master* der Threadgruppe. Er erhält die ThreadId 0.

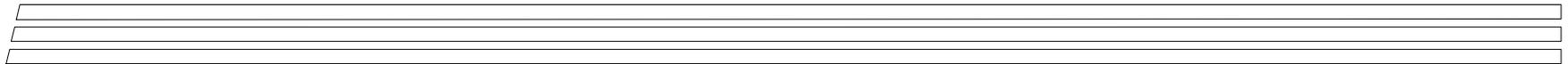
## Fork-Join-Modell



## *Beispiel: Hello World*

```
#include <stdio.h>
#include <omp.h>

int main(int argc, char* argv[]) {
    printf("Anzahl Prozessoren: %d\n", omp_get_num_procs());
    #pragma omp parallel
    { printf ("Thread %d von %d sagt \"Hallo Welt!\"\n",
              omp_get_thread_num(), omp_get_num_threads());
    }
    printf("Fertig.\n"); return 0;
}
```

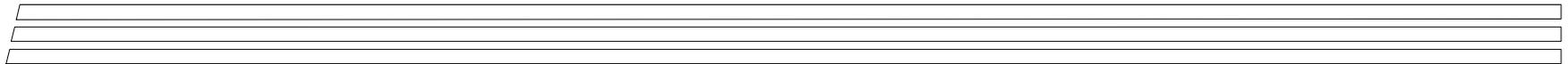


# Parallelisierung von Schleifen

- Haupteinsatzgebiet von OpenMP
- Jeder Thread führt den Schleifencode für eine andere Menge von Iterationen aus.

Bsp: SAXPY:  $y = a * x + y$  (scalar a x plus y)

```
for saxpy (const float a, const vector<float>& x,  
           const vector<float>& y)  
{  assert (x.size() == y.size());  
#pragma omp parallel for  
  for (int i = 0; i <x.size(); i++)  
  {    y[i] += a * x[i]    }  }
```



# *Pragmas for und parallel for*

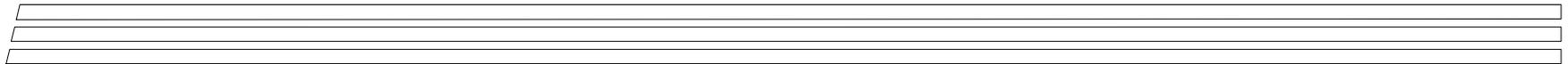
- Die `for` Direktive dient der Aufteilung von Schleifendurchläufen auf mehrere Threads:

```
#pragma omp for [clause list]

/* for loop */
```

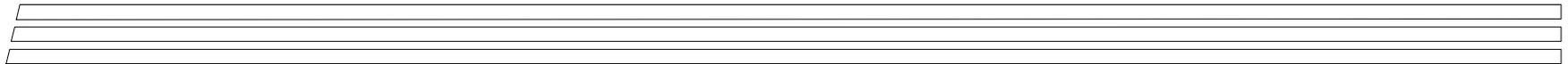
- `parallel for` ist eine Zusammenfassung der `parallel` und der `for` Direktive, wenn genau eine Schleife parallelisiert werden soll.
- Form parallelisierbarer Schleifen:

```
for index = start; index { <
                        { <=
                        { >= } end; { index++ / ++ index
                        { >   }     { index - - / - - index
                        {     }     { index += inc / index -= inc
                        {     }     { index = index + inc / - inc
                        {     }     { index = index - inc
```



## Zugriff auf Variablen

- **Default:** Alle Threads können auf alle Variablen im parallelen Codeabschnitt zugreifen.
- **Datenzugriffsklauseln** `klausel (variable, variable,...)`
  - **shared** und **private:**  
von allen Threads gemeinsam oder von einem Thread privat genutzt
  - **firstprivate** und **lastprivate:**  
Initialisierung und Finalisierung der Werte privater Variablen
  - **default:**  
Abänderung des Defaults
  - **reduction:**  
gemeinsam genutzte Variablen, in denen mehrere Threads Werte akkumulieren können



## Beispiel: Berechnung von $\pi$

```
const double delta_x = 1.0 / num_iter;
double sum = 0.0;
double x, f_x;
int i;
#pragma omp parallel for private(x, f_x) \
                        shared(sum)
    for (i = 1; i <= num_iter; i++) {
        x = delta_x * (i-0.5);
        f_x = 4.0 / (1.0 + x*x);
#pragma omp critical
        sum += f_x;
    }
return delta_x * sum;
```

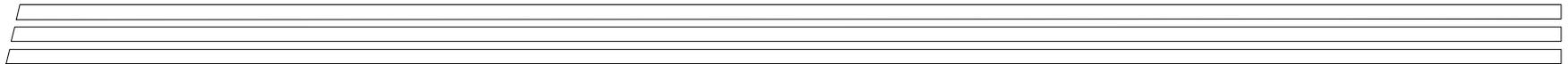
# *Pragma critical*

- `#pragma omp critical`  
stellt wechselseitigen Ausschluss bei der Ausführung des nachfolgenden Code-Blocks sicher

=> Synchronisation aller Threads

=> Ausbremsen paralleler Threads

=> effizientere Methode: Reduktionsvariablen

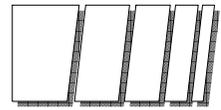


## *Reduktionsklausel*

- Die Reduktionsklausel ermöglicht die Reduktion der Werte mehrerer privater Kopien einer Variablen mittels eines Operators zu einem Wert, den die Variable beim Verlassen des parallelen Blocks im Master erhält.
- Die Klausel hat die Gestalt:  
`reduction (operator: variable list).`
- Die Variablen in der Liste werden implizit als privat festgelegt.
- Mögliche Operatoren sind: +, \*, &, |, ^, &&, ||.

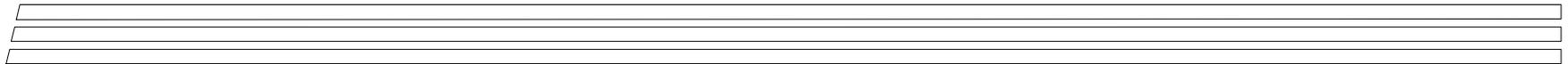
### Beispiel:

```
#pragma omp parallel reduction(+: sum) num_threads(8) {  
/* compute local sums here */  
}  
  
/*sum here contains sum of all local instances of sums */
```



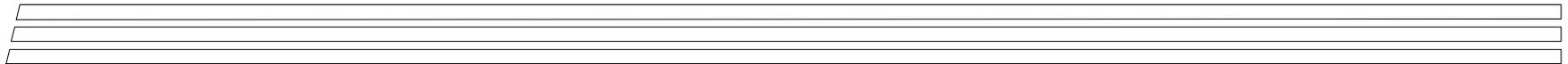
## Beispiel: Berechnung von $\pi$ mit Reduktion

```
const double delta_x = 1.0 / num_iter;
double sum = 0.0;
double x, f_x;
int i;
#pragma omp parallel for private(x, f_x) \
    reduction(+: sum)
for (i = 1; i <= num_iter; i++) {
    x = delta_x * (i-0.5);
    f_x = 4.0 / (1.0 + x*x);
    sum += f_x;
}
return delta_x * sum;
```



# *Reduktionsoperatoren*

<b>Operator</b>	<b>Bedeutung</b>	<b>Typen</b>	<b>Neutrales Element</b>
<b>+</b>	<b>Summe</b>	<b>float, int</b>	<b>0</b>
<b>*</b>	<b>Produkt</b>	<b>float, int</b>	<b>1</b>
<b>&amp;</b>	<b>bitweises Und</b>	<b>int</b>	<b>alle Bits 1</b>
<b> </b>	<b>bitweises Oder</b>	<b>int</b>	<b>0</b>
<b>^</b>	<b>bitweise XOR</b>	<b>int</b>	<b>0</b>
<b>&amp;&amp;</b>	<b>Logisches Und</b>	<b>int</b>	<b>1</b>
<b>  </b>	<b>Logisches Oder</b>	<b>int</b>	<b>0</b>



## *Initialisierung von privaten Variablen*

- Private Variablen sind beim Eintritt und beim Verlassen eines parallelen Abschnitts undefiniert.
- Die Klausel `firstprivate` dient dazu, private Variablen mit dem Wert der Variablen im Masterthread zu initialisieren.
- Die Initialisierung erfolgt nur einmal pro Thread und nicht z.B. einmal pro Schleifendurchlauf in einer parallelen Schleife.

### Beispiel:

```
x[0] = complex_function();  
#pragma omp parallel for private(j) firstprivate(x)  
for (i=0; i<n; i++) {  
    for (j=1; j<4; j++)  
        x[j] = g(i, x[j-1]);  
    answer[i] = x[1] - x[3];  
}
```

---

---

---

---

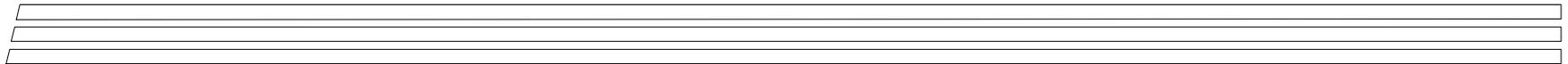
## Finalisierung von privaten Variablen

- Die Klausel `lastprivate` ermöglicht es, den Wert der Variablen, den sie bei sequentieller Ausführung in der letzten Iteration angenommen hätte, der Variablen im Masterthread zuzuweisen.

### Beispiel:

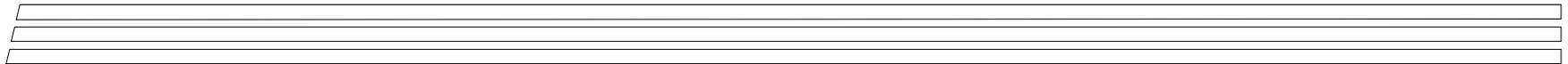
```
#pragma omp parallel for private(j) lastprivate(x)
  for (i=0; i<n; i++) {
    x[0] = 1.0;
    for (j=1; j<4; j++) x[j] = x[j-1] * (i+1);
    sum_of_powers[i] = x[0] + x[1] + x[2] + x[3];
  }
n_cubed = x[3];
```

- Eine Variable darf sowohl als `firstprivate` als auch als `lastprivate` deklariert werden. Es wird sichergestellt, dass alle Initialisierungen vor der Finalisierung abgeschlossen sind.



## *Änderung des Defaults*

- Die Klausel `default` erlaubt es, das Standardverhalten (`shared`) für nicht explizite Variablen zu ändern.
- Interessant ist lediglich die Festlegung `default none`.
- Die Option `none` führt dazu, dass der Compiler für jede Variable, die nicht in einer Zugriffsklausel (`private`, `shared`, `firstprivate`, `lastprivate`, `reduction`) auftritt, eine Fehlermeldung ausgibt und die Compilierung unterbricht.
- Bei der nachträglichen Parallelisierung seriellen Codes können auf diese Weise alle Variablen im aktuellen Gültigkeitsbereich gefunden und analysiert werden.

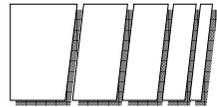


# Ablaufpläne mit *schedule*

- allgemeine Form: `schedule(scheduling_class[, parameter])`.
- OpenMP unterstützt vier scheduling Klassen:  
`static`, `dynamic`, `guided`, and `runtime`.

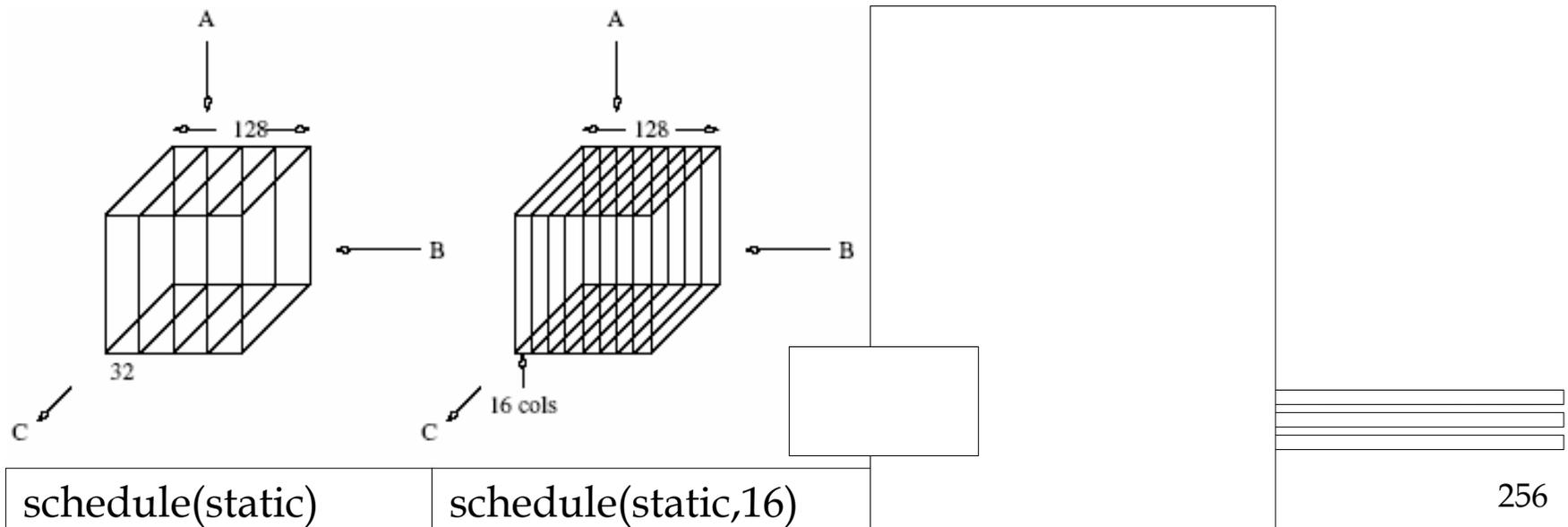
Typ	chunk?	Iterationen pro Stück	Stücke	Bezeichnung
<code>static</code>	nein	n/p	p	einfach, statisch
<code>static</code>	ja	c	n/c	überlappend
<code>dynamic</code>	optional	c	n/c	einfach, dynamisch
<code>guided</code>	↓ optional	anfangs n/c, dann abnehmend	< n/c	geführt
<code>runtime</code>	nein	unterschiedlich	unterschiedl.	unterschiedl.

**Kostenzunahme**



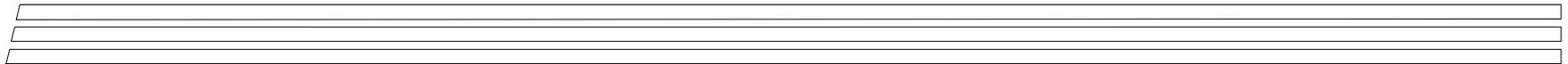
## Beispiel: Matrixmultiplikation

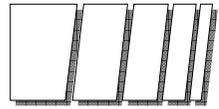
```
/* static scheduling of matrix multiplication loops */  
#pragma omp parallel default(private) shared (a, b, c, dim) \  
    num_threads(4)  
#pragma omp for schedule(static)  
for (i = 0; i < dim; i++) {  
    for (j = 0; j < dim; j++) {  
        c(i,j) = 0;  
        for (k = 0; k < dim; k++) {  
            c(i,j) += a(i, k) * b(k, j); }  
    }  
}
```



## *Weitere OpenMP Klauseln*

- Bedingte Parallelisierung: `if (skalärer Ausdruck)`  
legt fest, ob ein paralleles Konstrukt die Erzeugung von Threads bewirkt
- Nebenläufigkeitsgrad: `num_threads(integer expression)`  
spezifiziert die Anzahl der Threads, die erzeugt werden sollen

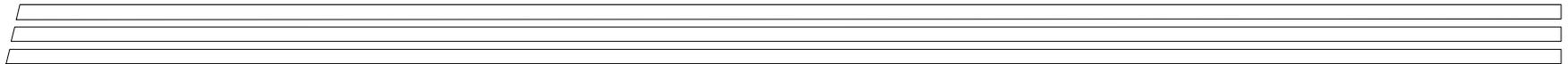


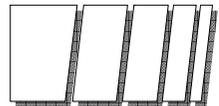


## Beispiel: OpenMP Klauseln

```
#pragma omp parallel if (is_parallel==1) num_threads(8) \  
  private (a) shared (b) firstprivate(c) {  
  /* structured block */  
}
```

- Falls die Variable `is_parallel` den Wert 1 hat, werden 8 Threads erzeugt.
- Jeder dieser Threads erhält private Kopien der Variablen `a` und `c`. Variable `b` wird gemeinsam genutzt.
- Der Wert von jeder Kopie von `c` wird mit dem Wert von `c` vor der parallelen Direktive initialisiert.
- Ohne Angabe werden Variablen gemeinsam genutzt. Mit der `default` Klausel kann dies geändert werden.





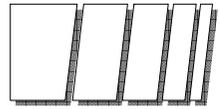
# OpenMP -> PThreads

```
int a, b;
main() {
  // serial segment
  #pragma omp parallel num_threads (8) private (a) shared (b)
  {
    // parallel segment
  }
  // rest of serial segment
}
```

Sample OpenMP program

```
int a, b;
main() {
  // serial segment
  Code inserted by the OpenMP compiler
  for (i = 0; i < 8; i++)
    pthread_create (....., internal_thread_fn_name, ...);
  for (i = 0; i < 8; i++)
    pthread_join (.....);
  // rest of serial segment
}
void *internal_thread_fn_name (void *packaged_argument) {
  int a;
  // parallel segment
}
```

Corresponding Pthreads translation



# Datenabhängigkeiten

- **notwendige Voraussetzung für Parallelisierung:**  
wechselseitige Unabhängigkeit der Ergebnisse der einzelnen Iterationen einer Schleife
- **Seien zwei Anweisungen A1 und A2 gegeben, wobei A1 in der sequentiellen Ausführung vor A2 liege.**
  - **echte Datenabhängigkeit (Flussabhängigkeit, RAW- read after write)**  
A1 schreibt in eine Speicherzelle, die von A2 gelesen wird.
  - **Gegenabhängigkeit (WAR – write after read)**  
A1 liest eine Speicherzelle, die anschließend von A2 geschrieben wird.
  - **Ausgabeabhängigkeit (WAW – write after write)**  
A1 und A2 schreiben in dieselbe Speicherzelle.

