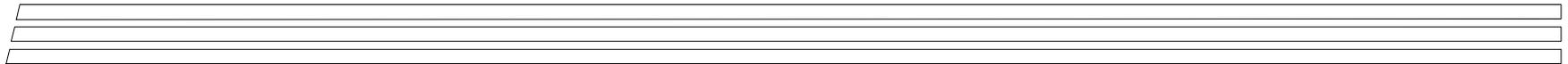
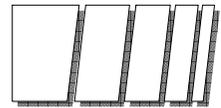


8. *HPF - High Performance FORTRAN*

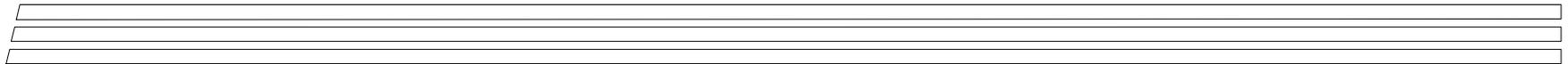
- datenparallele Erweiterung von FORTRAN 90
- SPMD-Ansatz
- daten-parallele Array-Operationen
- verteilte Datenstrukturen
- Schleifenparallelität

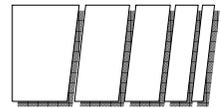




FORTRAN 77 -> FORTRAN 90 -> HPF

- **FORTRAN 90 = FORTRAN 77 +**
 - **Zeiger (pointers)**
 - **Rekursion**
 - **benutzerdefinierte Datenstrukturen**
 - **...**
 - **Matrizenoperationen , z.B. $A = B + C$, $A = B * C$, $A = B - C$**
- **HPF = FORTRAN 90 +**
 - **Direktiven (= strukturierte Kommentare zur Compilersteuerung)**
 - **Processors $pr(20)$ $pr(5;4)$**
 - **Align**
 - **Distribute**





Datenparallelität in FORTRAN 90

- FORTRAN 90 hat keine explizite Parallelität, aber implizite Datenparallelität über Arrays, meist Vektoren (eindimensional) und Matrizen (zweidimensional).
- Terminologie für Arrays:
 - Rang: Anzahl von Dimensionen
 - Vektor: eindimensionales Array
 - Form (shape):
Vektor, der die Anzahl der Elemente für jede Dimension angibt
Z.B.:

INTEGER I (10)

! Rang 1, Form (10)

REAL, DIMENSION (8,8) :: A, B

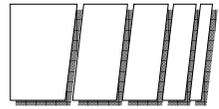
! Rang 2, Form (8,8)

REAL C (0:7, 0:7)

! Rang 2, Form (8,8)

A, B und C passen zueinander, wenn sie dieselbe Form haben.

Operationen können auf passende Arrays angewendet werden.



Datenparallele Arrayoperationen

- binäre Operationen
 - $B+C$, $B*C$, $B-C$
- unäre Operationen
 - $A = \text{sqrt}(B)$
- Array-Skalar-Operationen
 - $B+c$
 - $B*c$
- Reduktionsoperationen
 - $\text{SUM}(A)$
 - $\text{MAXVAL}(A)$
 - $\text{MAXLOC}(A)$
- Restrukturierungsoperationen
 - $\text{TRANSPOSE}(A)$

11	12	13	14	15
21	22	23	24	25
31	32	33	34	35
41	42	43	44	45

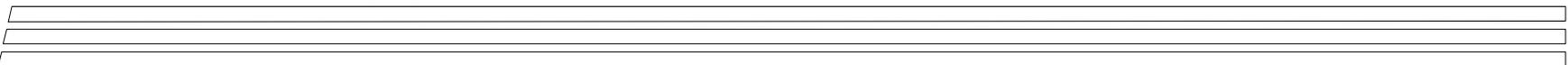
↓
cshift(A,-1)

41	42	43	44	45
11	12	13	14	15
21	22	23	24	25
31	32	33	34	35

11	12	13	14	15
21	22	23	24	25
31	32	33	34	35
41	42	43	44	45

↓
cshift(A,-3,2)

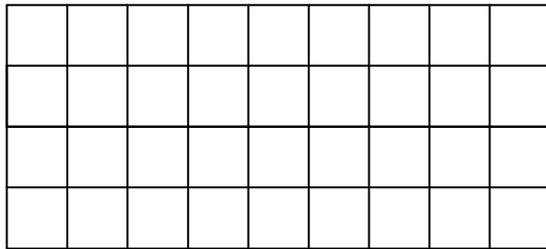
13	14	15	11	12
23	24	25	21	22
33	34	35	31	32
43	44	45	41	42



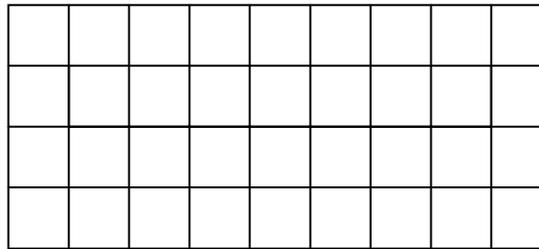
- $\text{CSHIFT}(A)$ (circular shift)

Sektionsnotation für Arrays

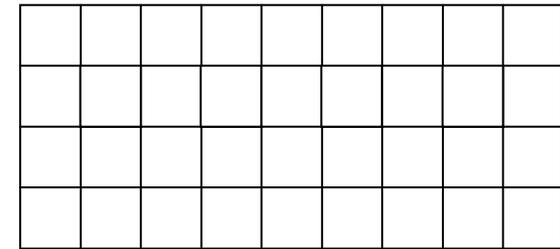
array (..., ini : end : offset/step ,)



A (2, :)

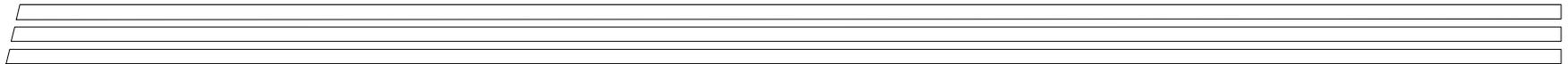


A (2, 2:8)



A (2, 2:9:2)

- **Defaultwerte sind:**
ini = untere Indexgrenze, end = obere Indexgrenze, offset = 1
A(:) ist also gleichbedeutend zu A.

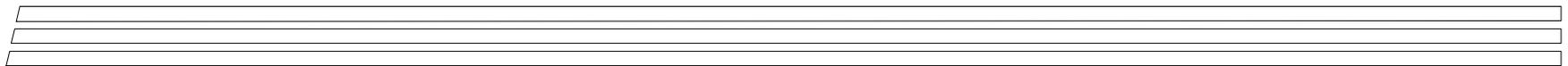




Irreguläre Arraysektionen

- **Irreguläre Arraysektionen werden durch Vektoren spezifiziert:**
Beispiel: Falls $V = (/5, 2, 1, 2/)$ bezeichnet
 $A(V)$ die Wertfolge $(/A(5), A(2), A(1), A(2)/)$.
- **Arraybezeichnungen können verschiedene Sektionsnotationen enthalten, z.B. $B(3:5:2,2,V)$.**
- **Rang und Form von Arrays werden durch die Dimensionen mit Sektionsindizes bestimmt – skalare Indizes spielen keine Rolle.**
Beispiel: $B(3:5:2, 2, V)$ mit $V = (/8, 1/)$ hat
den Rang 2 und die Form (2,2).

Die Elemente sind: $[B(3,2,8) B(3,2,1)]$
 $[B(5,2,8) B(5,2,1)]$



Datenparallele Arrayzuweisungen

In `var = expr`
wird `expr` vollständig für alle Indizes vor der Zuweisung ausgewertet,
d.h. in `expr` werden „alte“ Werte verwendet.

Beispiel:

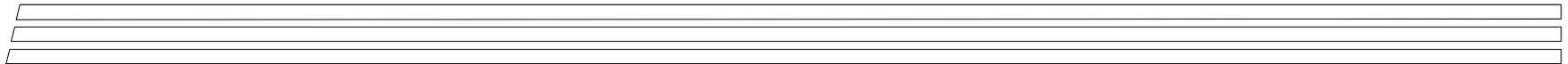
`A(2:3) = A(1:2)` bewirkt `A = (/ „altes“ A(1), „altes“ A(1), „altes“ A(2), ... /)`

Zum Vergleich:

`DO i=2,3`
`A(i) = A(i-1)` bewirkt `A = (/ „altes“ A(1), „altes“ A(1), „altes“ A(1), ... /)`
`ENDDO`

Letzteres ist gleichbedeutend mit `A(2:3) = A(1)`.

Weiteres Beispiel: `A(2:9) = 0.5 * (A(1:8) + A(3:9))`.



Logische Array-Ausdrücke (Masken)

- Vergleichsoperatoren: > >= < <= == /=
- Logische Operatoren: .AND. .OR. .EQV. .NEQV.
- Beispiel: Falls $V = (/ 1, 0, -5 /)$
ergibt $(V > 0)$ den Vektor $(/ .TRUE., .FALSE., .FALSE. /)$.
- Maskierung von Array-Zuweisungen mittels WHERE-Konstrukt:

Beispiele:

```
REAL A(10), B(10)
WHERE (A>0.0) B = 1.0/A
```

```
WHERE (A > 0.0)
  B = 1.0 / A
ELSEWHERE
  B = 0.0
ENDWHERE
```

Array Funktionen

Benutzerdefinierte Funktionen können Array-Resultate berechnen:

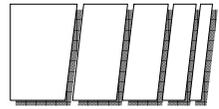
```
FUNCTION matvec (M, V)
  REAL M(:, :), V(SIZE(M,2)), matvec (SIZE(M,1))
  INTEGER i
  ! ----- !
  ! Returns matvec(i) = SUM_j {M(i,j) * V(j)} !
  ! ----- !
  DO i = 1, SIZE (matvec)
    matvec(i) = SUM (M(i,:) * V(:))
  ENDDO
END FUNCTION
```

.....

```
REAL A(10,10), V(10) ! Initialisiere A und V!
```

```
_____
_____
_____
```

```
V = matvec (A,V)
```



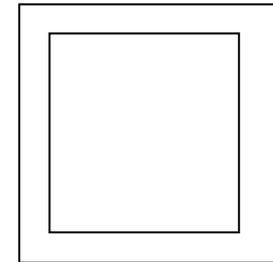
Beispiel: Jacobi Iteration

```
REAL, DIMENSION (m,n) :: a, old_a
```

```
old_a = 0.0
```

```
CALL init(a)      ! Rand von a festlegen
```

```
a (2:m-1, 2:n-1) = 0.0  ! Inneren Bereich auf 0.0 setzen
```



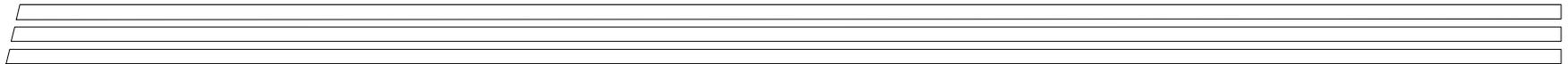
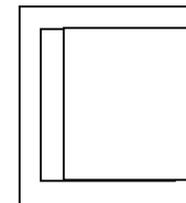
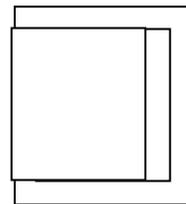
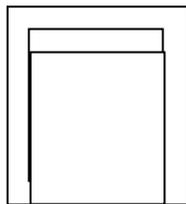
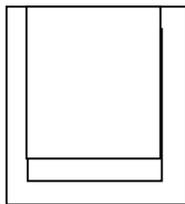
```
DO WHILE (ANY (a-old_a > 1E-07 * a))
```

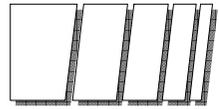
```
  old_a = a
```

```
  a (2:m-1, 2:n-1) = 0.25 *      &
```

```
    (a(1:m-2,2:n-1) + a(3:m, 2:n-1) + a(2:m-1,1:n-2) + a(2:m-1, 3:n))
```

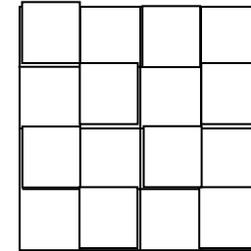
```
ENDDO
```

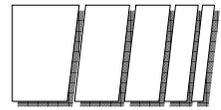




Beispiel: Rot-Schwarz-Relaxation

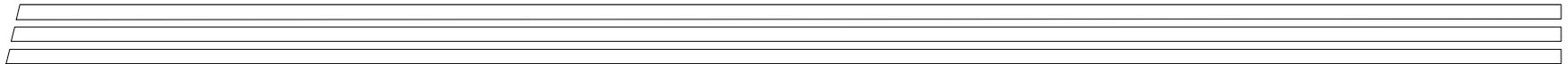
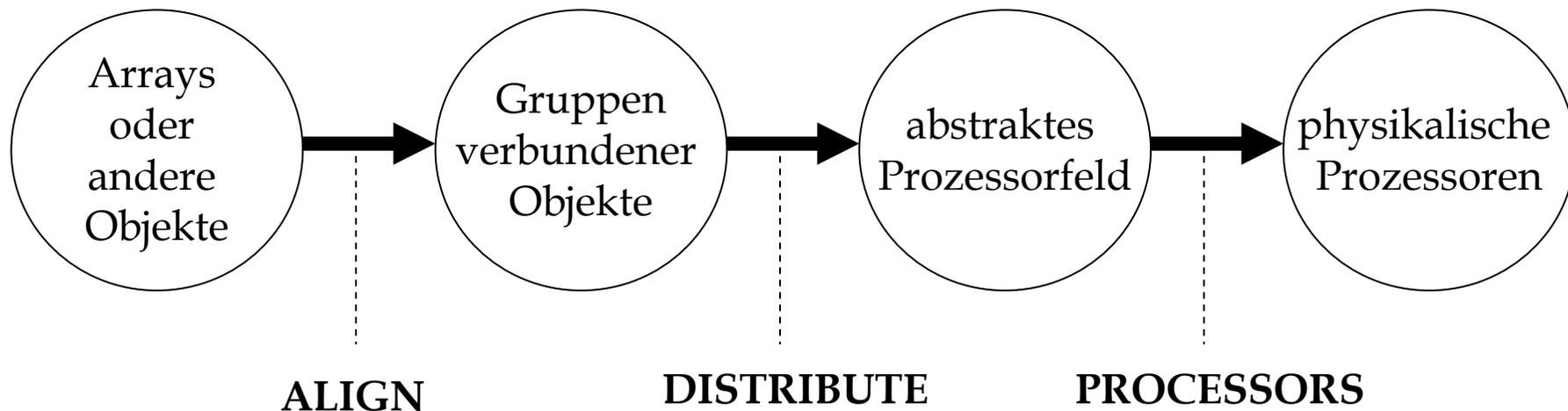
```
REAL, DIMENSION (m,n) :: a, old_a
LOGICAL :: even (m-2, n-2)
old_a = 0.0
CALL init(a, even)      ! Rand von a festlegen
    ! Initialisiere even(i,j) mit .TRUE., falls i+j gerade, .FALSE. sonst
DO WHILE (ANY (a-old_a > 1E-07 * a))
    old_a = a
    WHERE (even)
        a (2:m-1, 2:n-1) = 0.25 *
            (a(1:m-2,2:n-1) + a(3:m, 2:n-1) + a(2:m-1,1:n-2) + a(2:m-1, 3:n))
    ELSEWHERE
        a (2:m-1, 2:n-1) = 0.25 *
            (a(1:m-2,2:n-1) + a(3:m, 2:n-1) + a(2:m-1,1:n-2) + a(2:m-1, 3:n))
    ENDWHERE
ENDDO
```





Ausführungsmodell von HPF

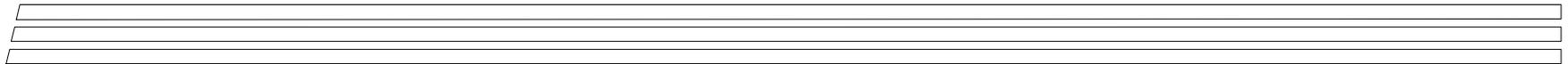
- Die HPF-Direktiven steuern die Abbildung von Daten auf Prozessorspeicher
- Zweistufige Abbildung:





HPF Datenverteilungsdirektiven

- **!HPF\$ PROCESSORS proc_name(dim1,dim2,..., dimN)**
deklariert ein abstraktes Prozessorfeld.
 - proc_name ist der Name des Prozessorfelds
 - dim1 ... dimN bestimmen die Größe und Form des Prozessorfelds
- **!HPF\$ ALIGN array WITH target**
verknüpft zwei Felder
- **!HPF\$ DISTRIBUTE list_of_arrays [ONTO proc_name]**
verteilt Felder auf ein Prozessorfeld



Die ALIGN-Direktive

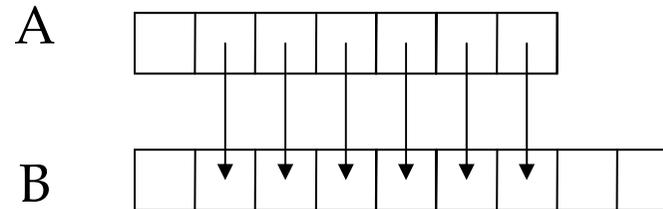
- ALIGN array WITH array

reference

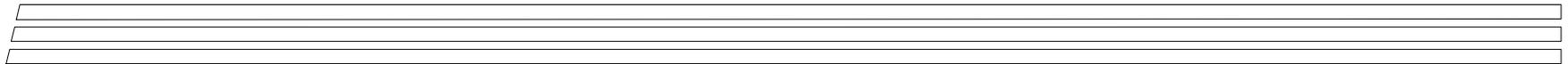
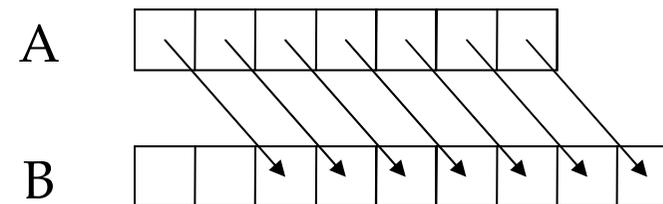
bewirkt die Verteilung von Arrays in Bezug auf ein Referenzarray.

Beispiele:

- ALIGN A(I) WITH B(I)

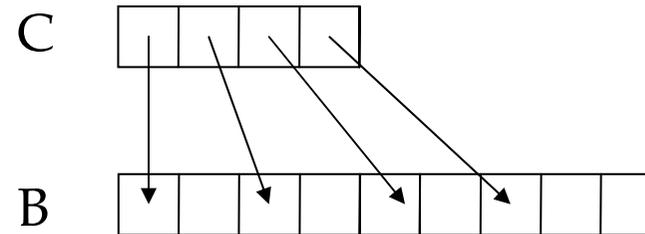


- ALIGN A(I) WITH B(I+2)

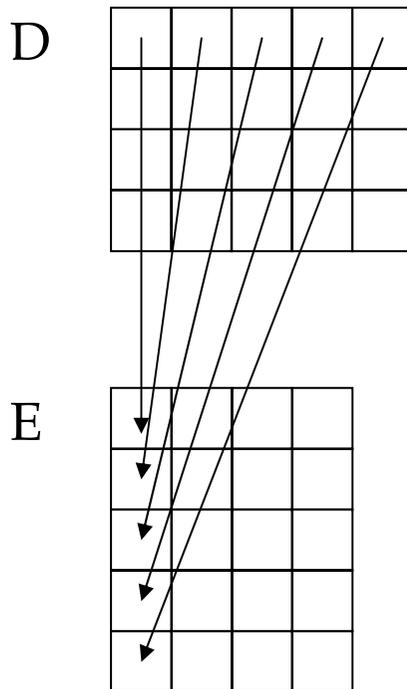


Weitere Beispiele

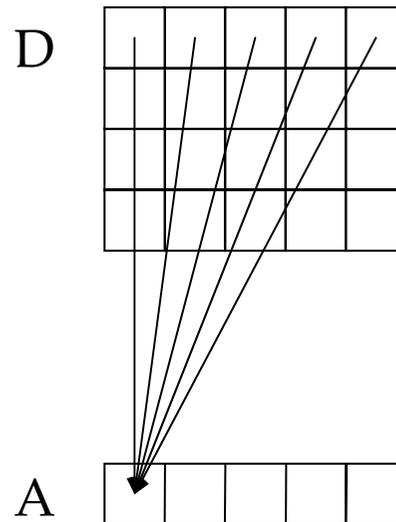
- **ALIGN C(I) WITH B(2*I)**



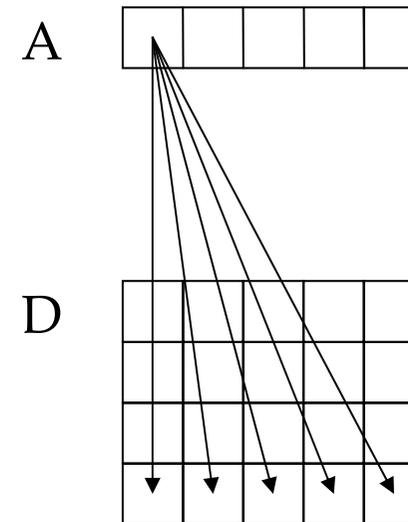
- **ALIGN D(I,J) WITH E(J,I)**



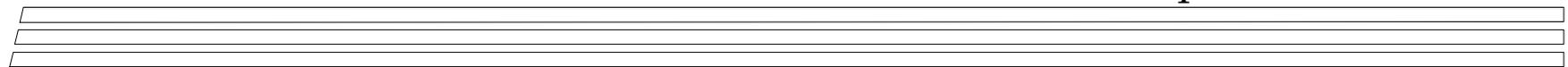
- **ALIGN D(:,*) WITH F(:)**



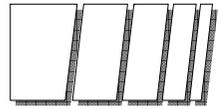
- **ALIGN F(:) WITH D(*,:)**



Replikation



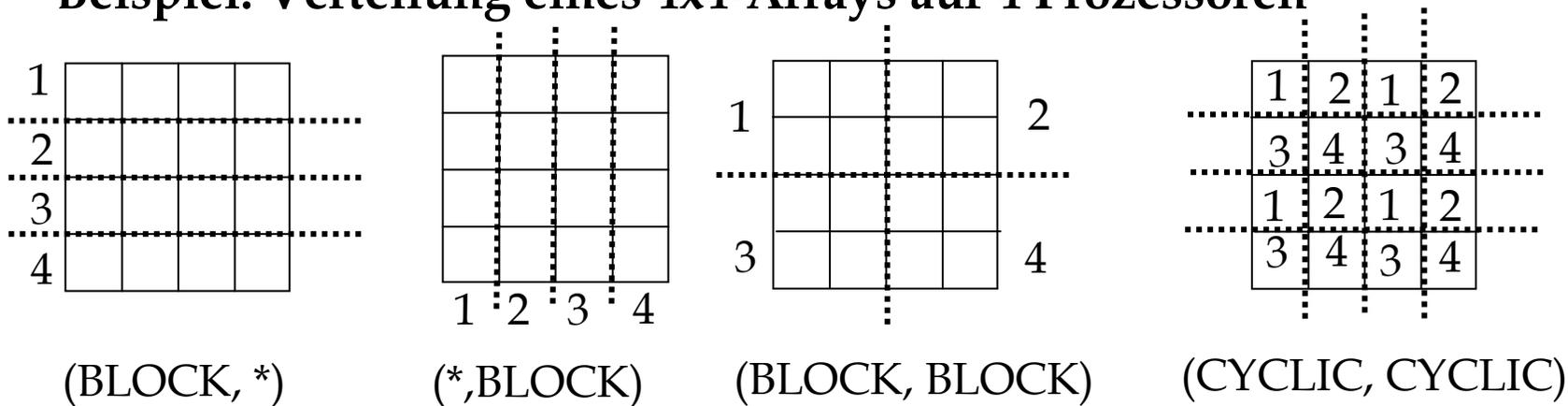
Transposition



Die Distribute-Direktive

- **DISTRIBUTE arrays [ONTO proc_name]**
dient der Verteilung von Arrays auf ein abstraktes Prozessorfeld
 - **blockweise** => zusammenhängende, etwa gleich große Blöcke
 - **zyklisch** => reihum Verteilung
 - ***** => keine Verteilung in entsprechender Dimension

Beispiel: Verteilung eines 4x4-Arrays auf 4 Prozessoren

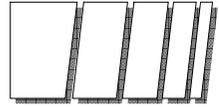


Beispiel: Jacobi mit HPF Direktiven

```
REAL, DIMENSION (m,n) :: a, old_a
!HPF$ PROCESSORS pr(4)
!HPF$ ALIGN a (:,:) WITH old_a(:,:)
!HPF$ DISTRIBUTE old_a(BLOCK,*) ONTO pr

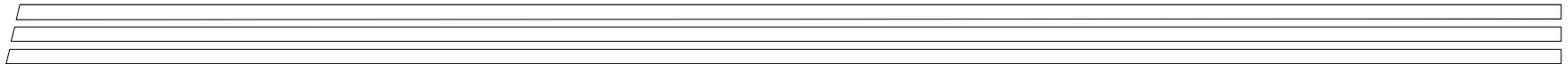
old_a = 0.0
CALL init(a)           ! Rand von a festlegen
a (2:m-1, 2:n-1) = 0.0 ! Inneren Bereich auf 0.0 setzen

DO WHILE (ANY (a-old_a > 1E-07 * a))
  old_a = a
  a (2:m-1, 2:n-1) = 0.25 *
    (a(1:m-2,2:n-1) + a(3:m, 2:n-1) + a(2:m-1,1:n-2) + a(2:m-1, 3:n))
ENDDO
```



Weiteres Beispiel: Pairwise Interactions

```
program hpf_pairwise_interactions
!HPF$ PROCESSORS pr(10)
real X(3,1000), Force(3,1000), Tmp(3,1000)
!HPF$ ALIGN Force(:,:) WITH X(:,:)
!HPF$ ALIGN Tmp(:,:) WITH X(:,:)
!HPF$ DISTRIBUTE X(*,BLOCK) ONTO pr
Force = 0.0
Tmp = X
do i = 1, 999
    tmp = CSHIFT(Tmp,1,2)
    Force = Force + f(X,Tmp)
enddo
end
```

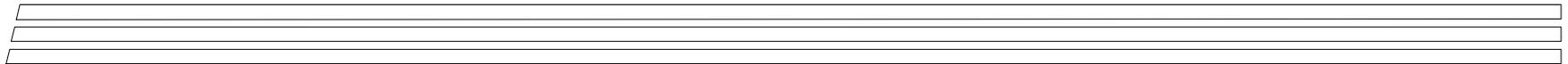


Schleifenparallelität mit FORALL

FORALL (range_1, ..., range_n, boolean_exp) assignment

Beispiele:

- FORALL (i=2:9) A(i) = 0.5*(A(i-1) + A(i+1))
ist gleichbedeutend mit A(2:9) = 0.5 * (A(1:8) + A(3:10))
- FORALL (i=1:10, A(i)>0.0) A(i) = 1/A(i)
ist gleichbedeutend mit WHERE (A(1:10)>0.0) A(1:10) = 1.0/A(1:10)
- FORALL (i=1:m, j=1:n) even(i,j) = (MOD (i+j, 2) == 0)
- FORALL (i=1,n) A(i,i) = ... ! Diagonale
FORALL (i=1,n, j=1,m, j>= i) = ... ! oberes Dreieck
- FORALL (i=1,n, j=1:m) &
C(i,j) = DOT_PRODUCT (A(i,:), B(:,j))



Die Independent-Direktive

Die INDEPENDENT-Direktive zeigt an, dass die Iterationen einer Do-Schleife unabhängig voneinander sind und daher parallel ausgeführt werden können.

Beispiel:

```
!HPF$ INDEPENDENT
```

```
DO i = 1, n1
```

```
!HPF$ INDEPENDENT
```

```
DO j=1,n2
```

```
DO k=1,n3
```

```
A(i,j) = A(i,j) + B(i,j,k)
```

```
ENDDO
```

```
ENDDO
```

```
ENDDO
```
