Index- und Speicherungsstrukturen

Bernhard Seeger

Fachbereich Mathematik und Informatik
Philipps-Universität Marburg

email: seeger@informtatik.uni-marburg.de
Tel.: 28-21526
Sprechstunde: Mi 13-14h und nach Vereinbarung

Homepage: http://www.mathematik.uni-marburg.de/~seeger/vor03WSindex.shtml

Organisation

- Voraussetzungen
  - gute Kenntnisse im Bereich Datenstrukturen (Praktische Informatik II)
- Literatur
  - es gibt derzeit kein empfehlenswertes Buch!!
  - Ordner in der Bibliothek enthält aber viele wichtigsten Originalarbeiten
- Übungen
  - zweiwöchentlich
  - geplant sind: 4 Implementierungsaufgaben + theoretische Aufgaben
  - Implementierungssprache: Java + XXL als Bibliothek
- Scheinkriterien
  - ohne Note:
    50% der Blattaufgaben und 2 von den ersten 3 Implementierungsaufgaben,
    50% der 4. Aufgabe.
  - mit Note:
    zusätzlich ein Kolloquium (Dauer: 20 Minuten)

Übersicht

1. Einführung
2. Speicherarchitekturen, Dateisysteme, Pufferorganisation, Seitenformate
3. Eindimensionale Indexstrukturen:
   - B-Bäume
   - Hashverfahren
4. Mehrdimensionale Indexstrukturen
   - Hauptspeicherstrukturen: kd-Baum, Quadranten-Baum
   - Verallgemeinerungen des B+-Baums
   - Mehrdimensionale Hashverfahren
5. Räumliche Indexstrukturen
   - R-Baum und Varianten
6. Zeitbezogene Indexstrukturen
   - Verallgemeinerung von B-Bäumen
7. Integration in Datenbanksysteme
8. XML-Indexstrukturen

1. Einführung

allgemeine und häufig auftretende Problemstellung:

- Gegeben:
  - homogene Menge O von Objekten/Datensätzen
  - Prädikat p: $O \rightarrow \{\text{true}, \text{false}\}$
- Gesucht:
  - Menge aller Objekte aus O, die p erfüllen:

$$\{o \mid o \in O \wedge p(o)\}$$

- *Datensätze* in einer homogenen Menge
  - gleicher Datensatztyp
- *Datensatztyp* besteht aus verschiedenen *Attributen*
  - Annahme: der Datentyp eines Attributs ist *einfach, z. B. INTEGER*

Beispiel

- Datensatztyp:
  TYPE LinieHalt = RECORD
  Linie: INTEGER;
  Haltestelle: STRING(80);
  Zeit: INTEGER;
  END;
- Menge der Datensätze:
  (7, Hans-Meerwein-Str., 516), (5, Wilhelmsplatz, 615), …
- Anfragen:
  - Finde alle Linien, die an der Haltestelle Hans-Meerwein-Str. halten.
  - Finde alle Linien, die zwischen 8 und 10 Uhr am Wilhelmsplatz halten.

Lösungsvorschlag

- Durchlaufe alle Datensätze in der Menge und teste das Prädikat
- Funktioniert zwar, aber sehr teuer: Linear in der Anzahl der Elemente.

Indexstrukturen

- effiziente Datenstrukturen zur Unterstützung von “einfachen” Suchoperationen.
- i.a. werden nur Anfragen bzgl. bestimmter Attribute unterstützt
  - Anzahl dieser Attribute = 1:*eindimensionale Zugriffsstrukturen*
  - Anzahl > 1: *mehrdimensionale Zugriffsstrukturen*
- Datensatz: (K, info), *Schlüssel* K = (K_1,K_2,…, K_d), d = *Dimension*
- Beispiele:
  - binäre Suchbäume (AVL-Baum, 2-3 Baum), Hashtabellen

in dieser Vorlesung

- Indexstrukturen für **Externspeicher**
  - eine homogene Datenmenge wird in einer Datei abgespeichert.
- Unterschied zu Hauptspeicherzugriffsstrukturen auf Grund der Eigenschaften von Externspeicher:
  - niedrige Speicherkosten: für 1 € gibt es 1GB IDE-Plattenspeicher
  - hohe Zugriffskosten, niedrige Transferkosten

    ==> CPU-Kosten können (nahezu) vernachlässigt werden.

Anforderung an Zugriffsstrukturen

effiziente Unterstützung von Suchoperationen:

- Suchoperationen:
  - ***Exact Match Query*** (x_1, …, x_k)
    spezifiziert k Attribute exakt.
  - ***Partial Match Query*** (*, x_{i1}, *, …, x_{i2}, …, x_{is})
    spezifiziert Werte für s < k Attribute; k-s Attribute bleiben unspezifiziert (*).
  - ***Range Query*** ([u_1,o_1], …, [u_k,o_k])
    spezifiziert k Bereiche mit $u_i \leq o_i$, $1 \leq i \leq k$.
  - ***Partial Range Query*** (*, [u_{i1},o_{i1}], *, …, [u_{is},o_{is}])
- weitergehende Suchoperationen
  - ***k-nächste Nachbarn***
    Zu X = (x_1, …, x_k) und einer Metrik d(.,.) sind die k Datensätze aus der Menge O gesucht, die minimalen Abstand zu X haben.
- mögliche Nebenbedingungen:
  - **sortierte** Ausgabe (bzgl. einem oder mehreren Attributen)

Dynamisches Einfügen, Löschen und Verändern von Datensätzen

- globale Reorganisation der gesamten Datenmenge ist oft nicht akzeptabel.
- *Beispiel: sortierte sequentielle Datei*
  - Das Einfügen eines Datensatzes erfordert im schlechtesten Fall, daß alle Datensätze um eine Position verschoben werden müssen.
  - Folge: auf alle Seiten der Datei muß zugegriffen werden.

  Das Einfügen, Löschen und Verändern von Datensätzen darf daher nur **lokale Änderungen** bewirken ("*think global act local*")

Komplettaufbau einer Zugriffsstruktur

- zu einer gegebenen Datenmenge O soll eine Zugriffsstruktur aufgebaut werden.
  - einfaches Hintereinanderausführen der gewöhnlichen Einfügeoperation ist ineffizient

  Kosteneinsparung durch Vorverarbeitung der Datenmenge (z. B. Sortieren)

Hohe Speicherplatzausnutzung

- Datenmengen können sehr groß werden.
- Eine möglichst *hohe Speicherplatzausnutzung* ist wichtig:
  - Speicherkosten für die Zugriffsstruktur << Speicherkosten für die Datenmenge.
  - Speicherplatzausnutzung der Datei soll hoch sein.
    (Datei soll möglichst gut gefüllt sein)

Leichte Integration in bestehende Systeme (z. B. DBS)

- Verwendung bereits vorliegender Schnittstellen (z. B. zum Dateisystem)
- obere Schnittstelle muß kompatibel zu den Systemanforderungen sein

  ==> einige Optimierungstechniken sind dann teilweise nicht möglich

Weitere Anforderungen

- **Implementierbarkeit**: je einfacher die Struktur desto besser ist ihre Akzeptanz.
- **Robustheit***:* gutes Verhalten im worst-case.
- **Implementierungskosten-Nutzen** Verhältnis der Zugriffsstrukturen sollte möglichst niedrig sein.

Klassifikation

mögliche Klassifikationskriterien für externe Zugriffsstrukturen

- eindimensionale und mehrdimensionale Zugriffsstrukturen
- nach unterstützen Anfragetypen
- nach unterstützen Datentypen (Zeit, Geo, Text, …) und ihren Eigenschaften (Ordnung, Distanz, …)
- nach den benutzten Techniken

Hashing	Interpolation	Baumstruktur
transformationsraumteilend	raumteilend	datenteilend
ordnungszerstörend	ordnungserhaltend	ordnungserhaltend

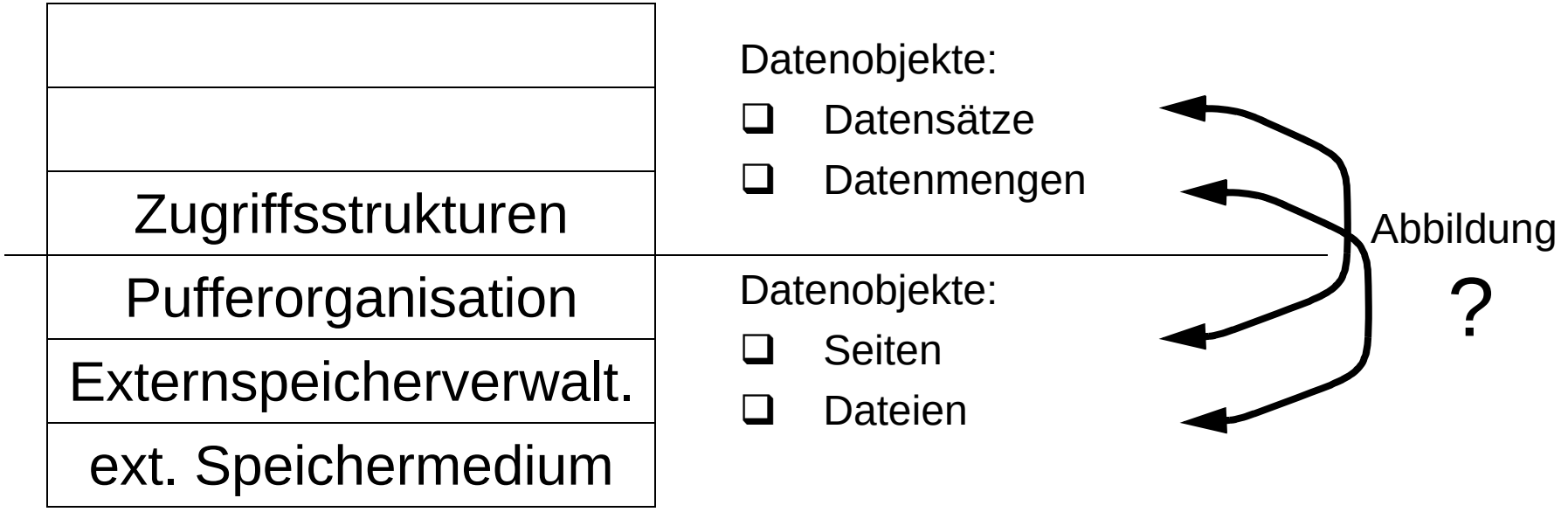
Bemerkung

Es ist überaus schwierig, einfache und gehaltvolle Klassifikationskriterien für alle Zugriffsstrukturen zu finden. In diesem Kurs wenden wir primär die Kriterien 1-3 an (siehe auch Übersicht der Vorlesung) und werden in den jeweiligen Kapiteln versuchen, eine Verfeinerung vorzunehmen.

2. Physische Speicherung von Daten

Anforderungen

- Persistenz
  - dauerhafte Speicherung der Daten, d.h. Daten überdauern das Programmende.
- Verwaltung sehr großer Datenmengen
  - Datenvolumen im GigaByte-Bereich.



- Speicherung auf ***Externspeicher***
  - i. a. Magnetplattenspeicher
  - Bänder und optische Platten
- nur kleiner Teil der Daten im *Hauptspeicher*:
  - i.a. keine Persistenz
  - Hauptspeicher sind zu klein
  - Kosten
    Es ist i.a. nicht effektiv, eine Datei vollständig vom Externspeicher in den Hauptspeicher zu laden, um beispielsweise nur eine Anfrage zu beantworten

2.1 Aufbau eines Magnetplattenspeichers

- ein Stapel übereinanderliegender rotierender Magnetplatten.
- Strukturierung:
  - *Zylinder*, *Spur* und *Sektor (Seite)*
  - Zugriff über einen Kamm mit Schreib-/Leseköpfen zugegriffen, der quer zur Rotation bewegt wird

Zugriff auf Seiten

- *Positionierung des Schreib-/Lesekopfes*
  ∅ Zeit für die Armbewegung [7 ms]
- *Warten auf den Sektor / Seite* (Rotationsverzögerung)
  ∅ halbe Rotationszeit der Platte [4,3 ms]
- *Übertragung der Seite (Transferzeit)*
  Zeit für Schreiben bzw. Lesen einer 4 KByte Seite [0,1 ms]
- *Kontrolle der Übertragung*
  Zeit des Platten-Controllers [< 1 ms]

Zeit für Zugriff auf eine Seite >> Zeit für Operation im Hauptspeicher !

Entwicklungstendenzen

- Zugriffszeit hat sich kaum verändert (Faktor 2 in den letzten 10 Jahren).
- Plattenspeicherkapazität hat sich erheblich erhöht (Faktor 10)
- Prozessorgeschwindigkeit erhöht sich jedes Jahr um Faktor 1,5.

==> eine E/A-Krise droht!

neue Entwicklungen in den letzten 10 Jahren:

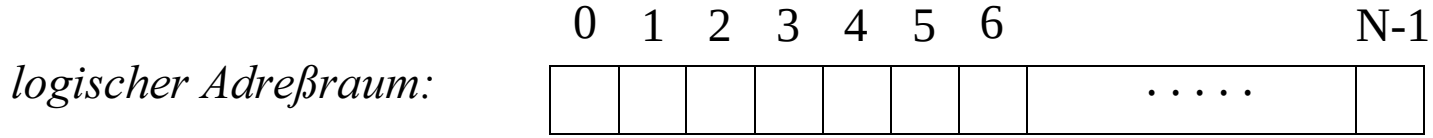
- Hardware
  - parallele Plattensysteme:
    RAID (Redundant and Independent Disks)
  - Plattencaches mit Prefetching von Seiten
  - effizientere Abbildung vom linearen Adreßraum auf die Platte
- Software (Externspeicherverwaltung)
  - effizientere Prefetching-Strategien
  - asynchrone E/A-Operationen
  - Anforderung mehrerer Seiten in einer E/A-Operation

2.2 Seitenorientiertes Dateisystem

- bietet die Grundfunktionalität für die Organisation von externen Datenstrukturen.

wichtige Datentypen

- Datei
  - bietet einen logischen Adreßraum von Seiten an



- Seite (Block)
  - *kleinste Transfereinheit* zwischen Haupt- und Sekundärspeicher
  - *Wahlfreier (direkter) Zugriff.*
  - *Feste Größe für das gesamte Dateisystem (*i. a. > 1 KByte und < 32 KByte)

  Größe der Seiten:
  - große Seiten = hohe Datenrate (gemessen in MBytes pro Sek.)
  - kleine Seiten = gute Plattenausnutzung
- Datei besteht aus mehreren exklusiv genutzten Seiten.

wichtige Operationen in Dateisystemen:

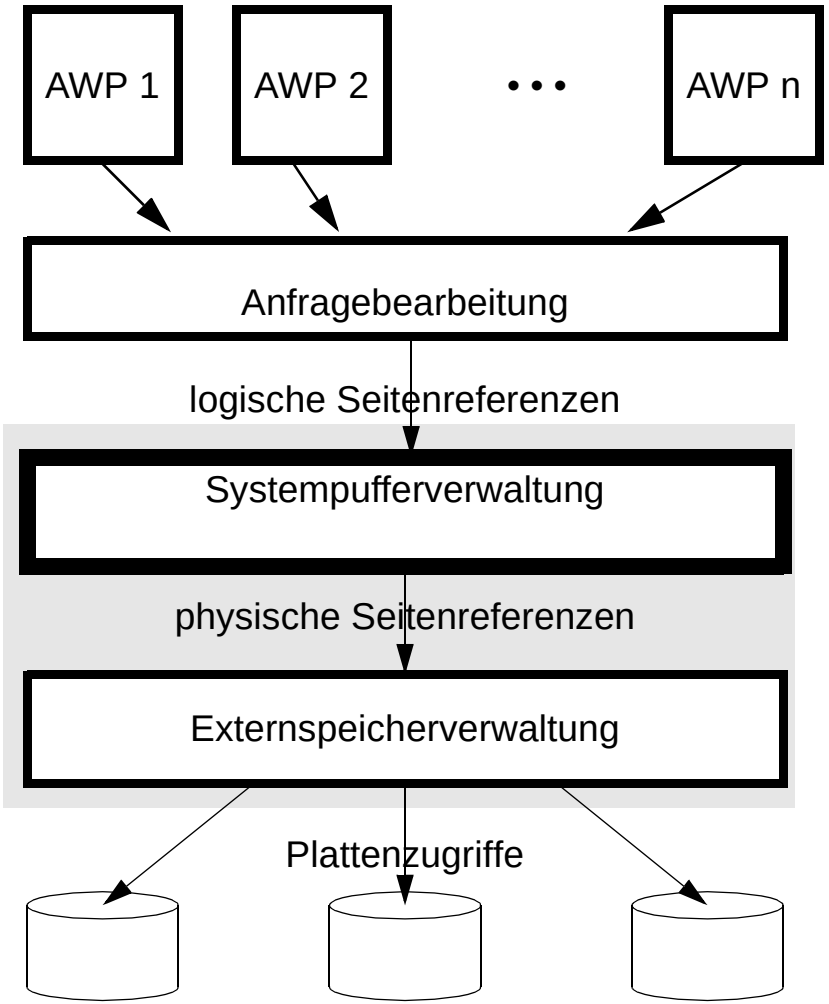
- Öffnen (und Schließen) von Dateien
  - Anbindung eines Dateinamens an eine Programmvariable
- Lesen und Schreiben von einer Seite
  - möglicherweise vom bzw. in einen Puffer
  - Umsetzung der logischen in physische Adressen (z.B. Zylinder-, Spur- und Sektornummer) erfolgt durch das Dateisystem.
- Allokation von neuen Datenseiten für Dateien
  - UNIX-Dateisystem erlaubt nur, daß eine Datei am Ende erweitert wird.
  - möglichst gute Clusterung von Dateien:
    logisch zusammenhängende Seiten sollen auch physisch nah beieinander liegen.
  - Freispeicherverwaltung
- Erzeugen und Löschen von Dateien

2.3 Seitenpuffer

- Puffer besteht aus Frames
  - Annahme: ein Frame kann genau eine Seite aufnehmen.
  - Puffer liegt im tatsächlichen HSP und nicht nur im virtuellen HSP.
- Ein Puffer kann für
  - eine Datei
  - eine Seitengröße
  - einen Dateityp

  verwendet werden.
  - Annahme: Dateisystem besitzt genau einen Puffer.
- Puffer wird gemeinsam von verschiedenen Programmen benutzt.
- Puffer liest direkt von der Platte (ohne daß die Seite nochmals in einem anderen Puffer gespeichert wird.)
- Zeitpunkt des Zurückschreibens einer modifizierten Seite wird allein durch den Pufferorganisator und nicht durch das einzelne Programm bestimmt.

Pufferorganisation



Schnittstelle:

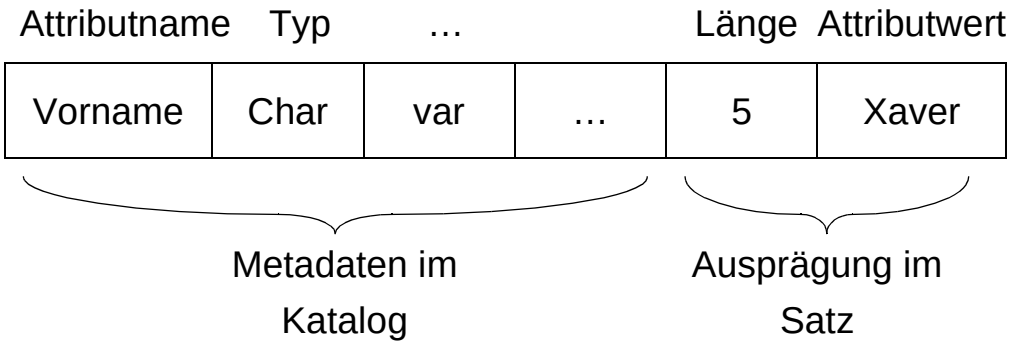
- Bereitstellen einer DB-Seite im DB-Puffer (zur exklusiven oder gemeinsamen Benutzung).
- Bereitstellen einer neuen Seite.
- Freigeben einer Seite.

intern verwendete Funktionen:

- effiziente Suche im Puffer
- Suche nach freien Frames
- Bestimmen einer Seite, die aus dem Puffer entfernt wird.
- Schreiben modifizierter Seiten

2.4 Abbildung von Sätzen

- Anforderungen:
  - physische Abspeicherung von Sätzen in Seiten
  - Operationen: Lesen, Einfügen, Modifizieren, Löschen
- Satzbeschreibung
  - pro Attribut:



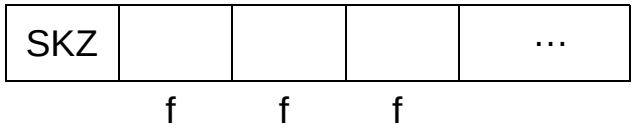
  - Satzbeschreibung separat in einem Katalog

Abspeicherungsformen

- Annahme: Satzlänge < Seitenlänge

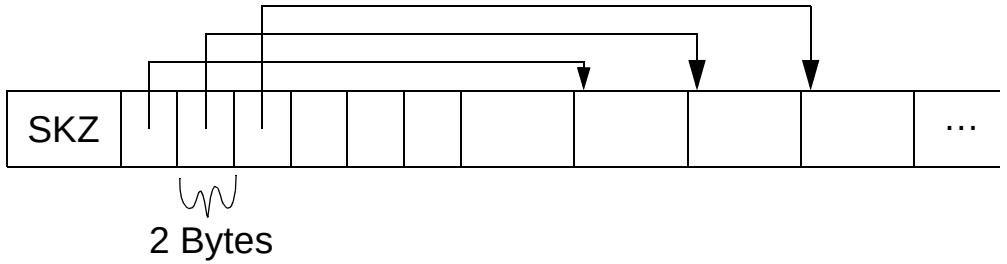
1. Satz mit Attributen fester Länge:

z.B. TID



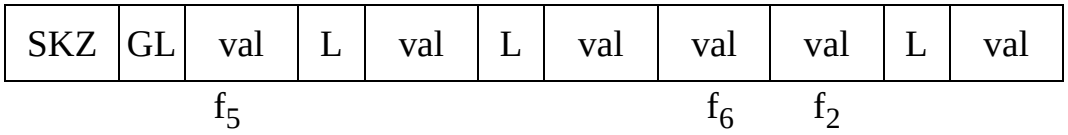
- für Attribute variabler Länge
  - speicheraufwendig
  - unflexibel

2. Satz mit Attributen variabler Länge (mit Zeiger im Vorspann):



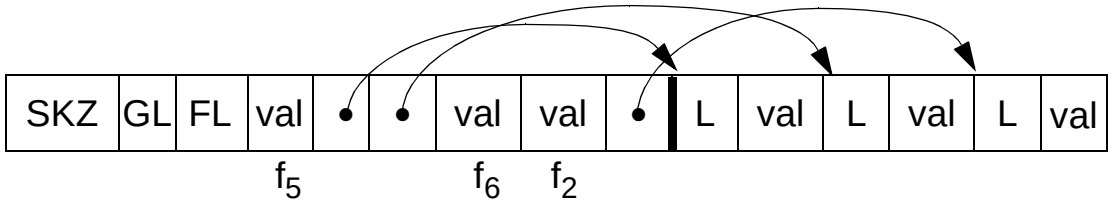
- unflexibel

- Flexiblere Abspeicherungsformen mit Zugriffsmöglichkeit auf einzelne Attribute
- Betrachte einen Datensatz der Form (f5, v, v, f6,f2,v) (f = fest, v = variabel)
  - eingebettete Längenfelder



    - dynamische Erweiterung möglich

  - Optimierung: eingebettete Längenfelder mit Zeigern



Adresse des n-ten Attributs kann berechnet werden

Annahme (im Rest der Vorlesung):

- Attribute mit fester Länge.

Zusammenfassung

- Zugriffsstrukturen für Externspeicher
  - vielfältige Anforderungen:
    hohe Speicherplatzausnutzung
    effiziente Suche
    dynamische Unterstützung von Änderungsoperationen
  - wichtige Klassen
    eindimensional - mehrdimensional
    statisch - dynamisch
- Abbildung von Sätzen
  - Speicherung variabel langer Felder
  - dynamische Erweiterungsmöglichkeiten
  - Berechnung von Feldadressen