

Rechnerarchitektur

Speicher

Univ.-Prof. Dr.-Ing. Rainer Böhme

Wintersemester 2021/22 · 19. Jänner 2022

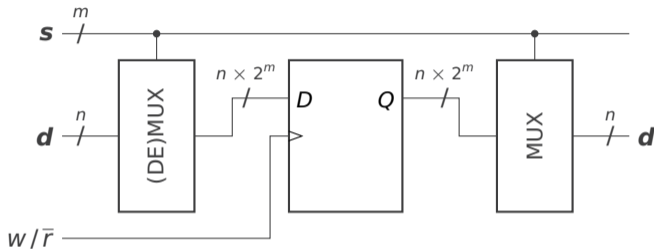
Erinnerung

Nicht vergessen !

Melden Sie sich online bis **spätestens 19.01.2022** zum ersten Klausurtermin an.
Nachmeldungen per E-Mail können wir **nicht** berücksichtigen.

Ausgangspunkt

Wiederholung der Skizze unseres bisherigen Speichermodells:



Problemfelder

- Kosten-Nutzen-Verhältnis
- Persistenz

Technologien zum Speichern von Information

- **Modifikation von Strukturen**

Lochkarte, Schallplatte

- **Magnetismus**

Magnetkernspeicher,
Magnetband, Diskette,
Festplatte

- **Elektrische Ladung**

Kondensator, isoliertes Gatter

- **Rückkopplung**

Flipflop, Schwingkreis

- **Optik**

Barkode, CD-ROM, DVD

Vergleichskriterien

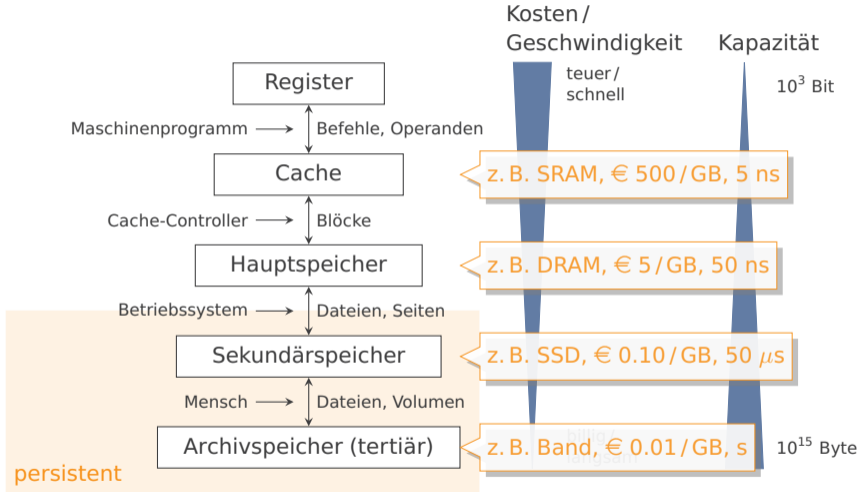
- Persistenz
- Geschwindigkeit
(Zugriff, Übertragung)
- Kapazität
- Dichte
- Energiebedarf
- Robustheit
- Kosten

Es gibt auch **Kombinationen**, z. B. magneto-optisch.

Gliederung heute

- 1. Speicherhierarchie**
2. Aufbau und Ansteuerung von dynamischem RAM
3. Aufbau und Ansteuerung von Flash-Speicher
4. Ausblick

Speicherhierarchie



Quelle für Preise: J. McCallum, <https://jcmmit.net>, eigene Rundung und Aktualisierung 2020

Vorsätze für Maßeinheiten

Präfix	Aussprache	Menge dezimal	Menge binär
E	Exa	$(10^3)^6 = 10^{18}$	$(2^{10})^6 = 2^{60}$
P	Peta	$(10^3)^5 = 10^{15}$	$(2^{10})^5 = 2^{50}$
T	Tera	$(10^3)^4 = 10^{12}$	$(2^{10})^4 = 2^{40}$
G	Giga	$(10^3)^3 = 10^9$	$(2^{10})^3 = 2^{30}$
M	Mega	$(10^3)^2 = 10^6$	$(2^{10})^2 = 2^{20}$
k	Kilo	$(10^3)^1 = 10^3 = 1\,000$	$(2^{10})^1 = 2^{10} = 1\,024$
		$(10^3)^0 = 1$	
m	Milli	$(10^3)^{-1} = 10^{-3}$	
μ	Mikro	$(10^3)^{-2} = 10^{-6}$	
n	Nano	$(10^3)^{-3} = 10^{-9}$	
p	Piko	$(10^3)^{-4} = 10^{-12}$	

Aufgepasst! Kapazitäten von Speicherbausteinen werden immer noch **binär** angegeben. Bei Speichermedien und in der Datenübertragung ist die **dezimale** Interpretation verbreitet.

Akronyme für flüchtigen Speicher

- **RAM** (*random access memory*): Speicher mit wahlfreiem Zugriff auf beliebige Adressen (früher im Gegensatz zu Bandspeicher)
- **SRAM** (*static . . .*): statisches RAM, am besten vergleichbar mit D-Flipflops, 4–8 Transistoren pro Bit
- **DRAM** (*dynamic . . .*): dynamisches RAM, das Inhalte nach Auslesen und durch Entladung eines Kondensators im Zeitverlauf vergisst, 1 Transistor pro Bit (→ viel dichter und damit billiger als SRAM)
- **SDRAM** (*synchronous DRAM*): Steuerleitungen wirken bei steigender Flanke des **Speichertakts** (i. d. R. niedriger als CPU-Takt)
- **DDR-SDRAM** (*double data rate . . .*): Leistungssteigerung durch Auslesen mehrerer benachbarter Bits pro Zugriff

Alle **flüchtigen Speicher** verlieren ihren Inhalt ohne Stromversorgung.

Akronyme für persistenten Speicher

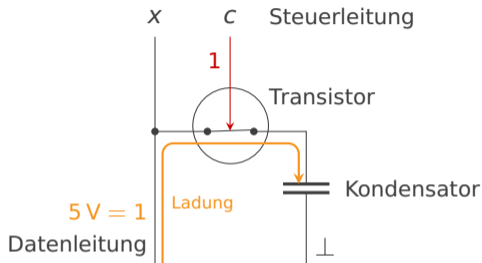
(persistent = nicht flüchtig: Inhalt bleibt ohne Stromversorgung erhalten)

- **ROM** (*read only memory*): nur Lesezugriff
- **PROM** (*programmable ROM*): einmaliger Schreibzugriff (z. B. durch Durchbrennen von „Sicherungen“ (*fuses*) bei der Herstellung)
- **EPROM** (*erasable PROM*): elektrisch programmierbares („brennen“) und durch UV-Licht lösches PROM
- **EEPROM** (*electrically erasable . . .*): Löschen und Wiederbeschreiben geschieht elektrisch
(→ heute bekannt als Flash-Speicher in SSDs)
- **HDD** (*hard disk drive*): magnetische Festplatte mit einem Stapel rotierender Scheiben

Gliederung heute

1. Speicherhierarchie
2. **Aufbau und Ansteuerung von dynamischem RAM**
3. Aufbau und Ansteuerung von Flash-Speicher
4. Ausblick

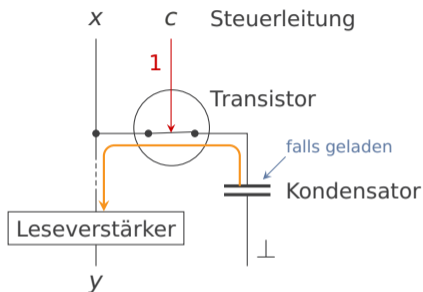
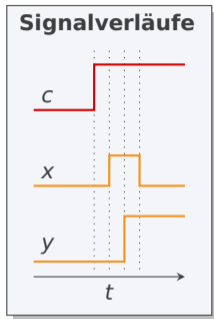
DRAM-Speicherzelle



Schreiben einer DRAM-Zelle

1. Setze die Datenleitung x auf das abzuspeichernde Potenzial.
2. Setze die Steuerleitung $c = 1$, sodass der Transistor leitet.
3. Nach Abschluss der (Ent-)Ladung kann $c = 0$ gesetzt werden.

DRAM-Speicherzelle



Auslesen einer DRAM-Zelle

1. Schalte die Datenleitung an den Eingang eines Leseverstärkers.
2. Setze die Steuerleitung $c = 1$, sodass der Transistor leitet.
3. Schalte ein stabiles Flipflop, falls ein Impuls gemessen wird.

DRAM-Auffrischung

Der Kondensator jeder DRAM-Zelle entlädt sich beim Auslesen und durch Leckströme von selbst.

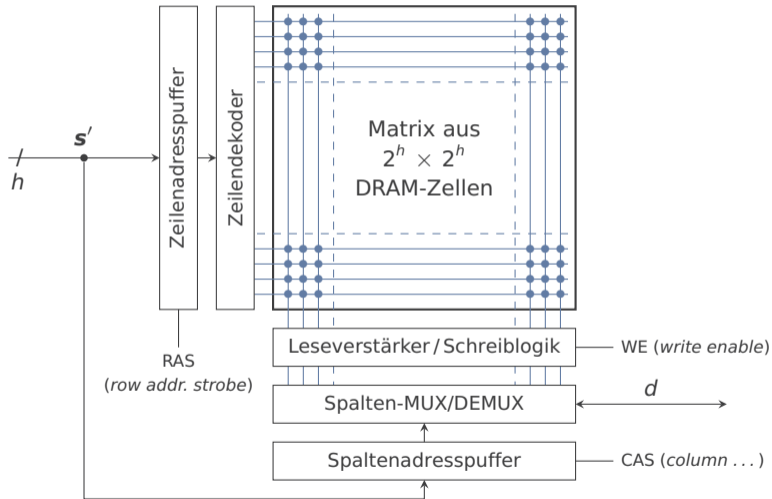
Abhilfe: Nach dem Auslesen und zyklisch ca. alle 30–60 Millisekunden wird der aktuelle Wert erneut geschrieben. Diese Aufgabe übernimmt i. d. R. die Ansteuerungslogik oder ein Speicher-Controller.

DRAM verbraucht deshalb im Betrieb mehr Energie (und erzeugt mehr Wärme) als SRAM.

Trend: Leckströme und Energieverbrauch mit Spannung senken:

- 2.5 V bei DDR-SDRAM (2000)
- 1.8 V bei DDR2-SDRAM (2004)
- 1.5 V bei DDR3-SDRAM (2007)
- 1.2 V bei DDR4-SDRAM (2012)
- 1.1 V bei DDR5-SDRAM (2020)

Aufbau von DRAM-Bausteinen



Ansteuerung beim Lesezugriff

1. WE deaktivieren.
2. Anlegen der **Zeilenadresse** und Übernahmen in den Zeilenadresspuffer durch Aktivierung des Steuersignals RAS.
→ Bitvektor der aktivierten Zeile liegt am Leseverstärker an.
3. Anlegen der **Spaltenadresse** und Übernahmen in den Spaltenadresspuffer durch Aktivierung des Steuersignals CAS.
→ Der Spaltenmultiplexer gibt das gewählte Bit aus.

Beschleunigung bei Mehrfachzugriff

- Neue Spaltenadresse anlegen (Fast Page Mode, FPM), ca. $2\times$
- Spaltenadresse automatisch hochzählen (Burst-Modus), ca. $16\times$

4. WE aktivieren, um Bitvektor zurückzuschreiben.

Ansteuerung beim Schreibzugriff

1. Anlegen der **Zeilenadresse** und Übernahmen in den Zeilenadresspuffer durch Aktivierung des Steuersignals RAS.
→ Bitvektor der aktivierten Zeile liegt am Leseverstärker an.
2. Anlegen der **Spaltenadresse** und Übernahmen in den Spaltenadresspuffer durch Aktivierung des Steuersignals CAS und WE aktivieren.
→ Der Spaltendemultiplexer fügt Bit d in die Zeile ein.
→ Die Zeile wird zurückgeschrieben.

Erweiterungen zur Erhöhung der Zuverlässigkeit

Behandlung von Fertigungs- und Umgebungseinflüssen

- **Kodierung** zur Fehlererkenntnis und Fehlerkorrektur
- z. B. zusätzliche Paritätsbits (binäre Quersumme), Kreuzsicherung, Schreiben unter Berücksichtigung von defekten Zellen, ...

Vertiefung in **Rechnernetze und Internettechnik**, Pflichtmodul, 3. Semester

Behandlung von Fehlern der Ansteuerung (insb. Programmierung)

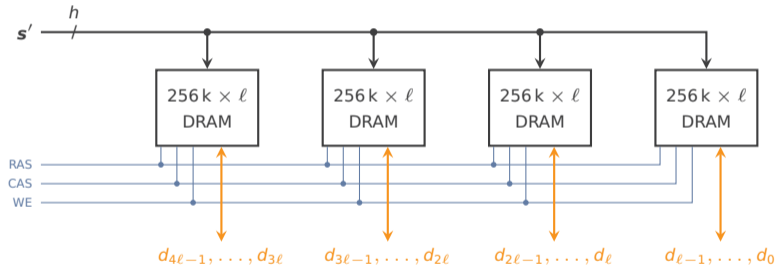
- **Speicherschutz**: CPU prüft Adressbus vor Zugriff.
- Ausnahmebehandlung bei Verletzung
- Berechtigungen werden im privilegierten Modus (d. h. vom Betriebssystem) vergeben.

Vertiefung in **Betriebssysteme**, Pflichtmodul, 2. Semester

Hauptspeicher aus mehreren DRAM-Bausteinen

Beispiel: $h = 9 \Rightarrow 2^{18} = 256 \text{ k} \times \ell$ Bit pro Baustein

Variante 1: Erweiterung der Wortbreite

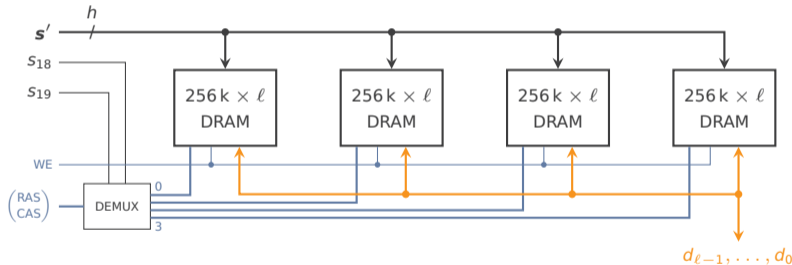


Gemeinsame Adress- und Steuerleitungen; getrennte Datenleitungen

Hauptspeicher aus mehreren DRAM-Bausteinen

Beispiel: $h = 9 \Rightarrow 2^{18} = 256 \text{ k} \times \ell$ Bit pro Baustein

Variante 2: Erweiterung des Adressraums



Gemeinsame Datenleitungen; Auswahl des Bausteins durch Schaltung der Steuersignale über die höchstwertigen Adressleitungen

Hörsaalfragen



24 82 94 16

Es sei $\ell = 8$ Bit.

1. In welchem DRAM-Baustein wird das vierte Bit der Adresse $0x020000$ bei **Variante 1** (Erweiterung der Wortbreite) gespeichert?
2. In welchem DRAM-Baustein wird das vierte Bit der Adresse $0x020000$ bei **Variante 2** (Erweiterung des Adressraums) gespeichert?
 - a. erster Baustein (von links)
 - b. zweiter Baustein
 - c. dritter Baustein
 - d. vierter Baustein (ganz rechts)

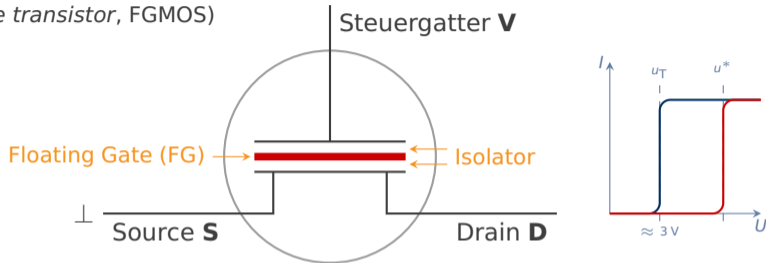
Zugang: <https://arsnova.uibk.ac.at> mit Zugangsschlüssel **24 82 94 16**. Oder scannen Sie den QR-Kode.

Gliederung heute

1. Speicherhierarchie
2. Aufbau und Ansteuerung von dynamischem RAM
3. **Aufbau und Ansteuerung von Flash-Speicher**
4. Ausblick

Feldeffekttransistor mit isoliertem Gatter

(engl. *floating gate transistor*, FGMOS)



- Im Floating Gate können Ladungsträger durch quantenmechanische Tunneleffekte „eingesperrt“ werden. Dazu sind Spannungen $\approx 10\text{ V}$ nötig.
- Wenn das FG nicht geladen ist, reagiert der FGMOS wie ein Transistor: Er leitet, wenn die Spannung am Steuergatter größer als u_T ist.
- Ein geladenes FG schirmt das Steuergatter ab und verschiebt den Arbeitspunkt des Transistors auf höhere Spannungen u^* .
- Im Zustand des FG lässt sich (mindestens) ein Bit speichern.

Ansteuerung eines FGMOS

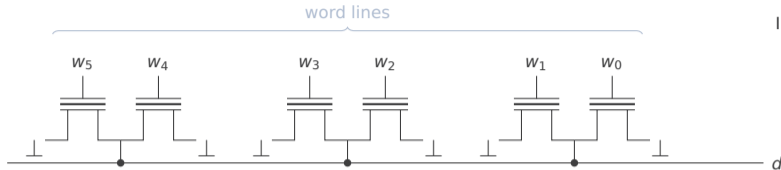
Zustands(übergangs)tabelle

Steuergatter V	Drain D	FG-Ladung	Transistor	Zustand
Lesezugriff				
$u_T < 3.3\text{V}$	$> \perp$	ungeladen	leitet	logisch 1
$u_T < 3.3\text{V} < u^*$	$> \perp$	negativ geladen	sperrt	logisch 0
$> u^*$	$> \perp$	negativ geladen	leitet	logisch 0
Schreib- und Löschezugriff				
$> 10\text{V}$	\perp	steigt		$\rightarrow 0$
\perp	$> 10\text{V}$	fällt		$\rightarrow 1$

Aufbau von Flash-Bausteinen

NOR-Flash

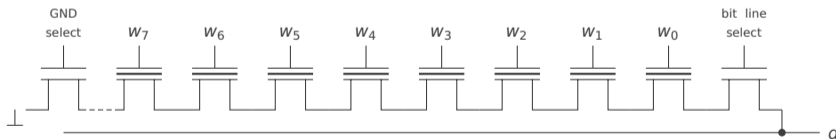
Intel seit 1988



Die Datenleitung d geht auf 0, wenn an mindestens einer $word\ line\ w_i$ eine Spannung über dem Arbeitspunkt des Feldeffekttransistoren anliegt.

NAND-Flash

Toshiba seit 1989



Die $bit\ line$ geht auf 0, wenn an allen $word\ lines\ w_i$ eine Spannung über den jeweiligen Arbeitspunkten der Feldeffekttransistoren anliegt.

Vergleich von Flash-Technologien

NOR-Flash

- + adressierbar wie RAM
- + wahlfreies Lesen und Schreiben
- + i. d. R. fehlerfrei
- Schreiben nur langsam
- hoher Energieverbrauch
- geringe Speicherdichte
- teuer (pro Bit)

- geeignet für Programmcode

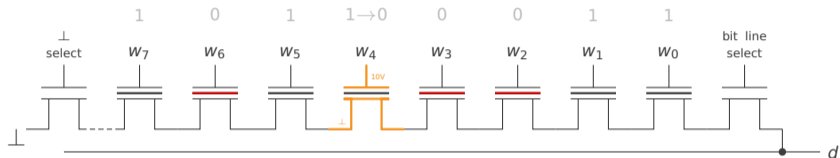
NAND-Flash

- + billig (pro Bit)
- + hohe Speicherdichte
- + schnell
- + wahlfreies Lesen
- Löschen nur blockweise
- komplizierte Ansteuerung
- Produktionsfehler nicht vernachlässigbar
- Abnutzung

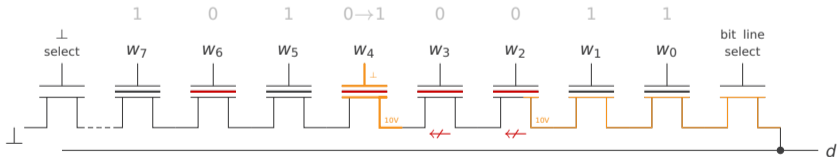
- geeignet für Dateisysteme

Schreiben und Löschen bei NAND-Flash

NAND-Flash schreiben



NAND-Flash löschen



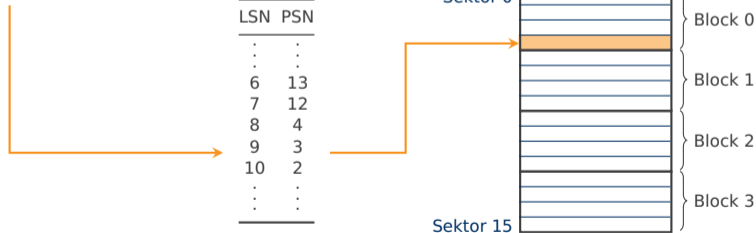
Flash Translation Layer (FTL)

Verbergen der **Nachteile von NAND-Flash** in einer Steuerschicht:

1. Übersetzt logische (L*N) in physische (P*N) Adressen
2. Gleichmäßige Verteilung der Löschoptionen (*wear leveling*)
3. Ausschluss fehlerhafter Blöcke (ggf. Fehlerkorrektur)

Variante 1: Sektor-Mapping

„Schreibe nach LSN 9.“



Neue Anforderung: Konsistenz der Verwaltungsdaten bei Stromausfall

Flash Translation Layer (FTL)

Verbergen der **Nachteile von NAND-Flash** in einer Steuerschicht:

1. Übersetzt logische (L*N) in physische (P*N) Adressen
2. Gleichmäßige Verteilung der Löschoptionen (*wear leveling*)
3. Ausschluss fehlerhafter Blöcke (ggf. Fehlerkorrektur)

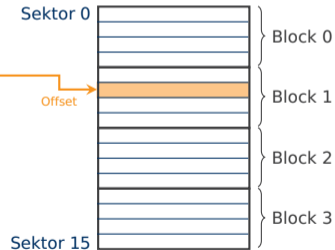
Variante 2: Block-Mapping

„Schreibe nach LSN 9.“

$$\text{LSN} = 4 \times \text{LBN} + \text{Offset}$$

$$\Rightarrow \text{LBN} = 2, \text{Offset} = 1$$

LBN	PBN
0	2
1	3
2	1
3	0



Neue Anforderung: Konsistenz der Verwaltungsdaten bei Stromausfall

Flash Translation Layer (FTL)

Verbergen der **Nachteile von NAND-Flash** in einer Steuerschicht:

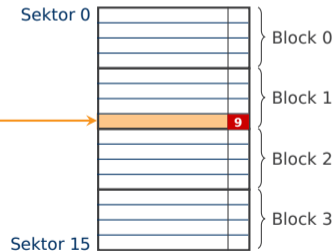
1. Übersetzt logische (L*N) in physische (P*N) Adressen
2. Gleichmäßige Verteilung der Löschoptionen (*wear leveling*)
3. Ausschluss fehlerhafter Blöcke (ggf. Fehlerkorrektur)

Variante 3: Hybrides Mapping

„Schreibe nach LSN 9.“

$$\text{LBN} = \lfloor \text{LSN} : 4 \rfloor = 2$$

LBN	PBN
0	2
1	3
2	1
3	0



Neue Anforderung: Konsistenz der Verwaltungsdaten bei Stromausfall

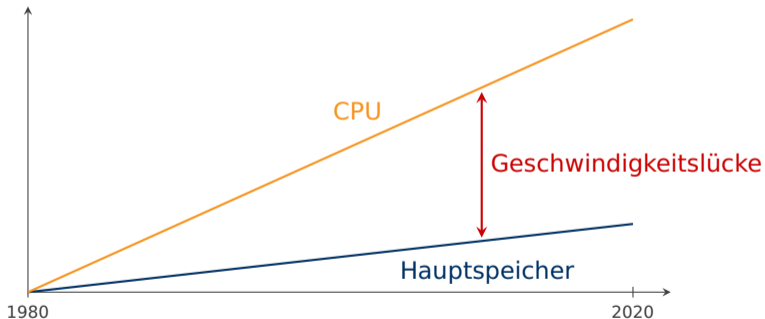
Gliederung heute

1. Speicherhierarchie
2. Aufbau und Ansteuerung von dynamischem RAM
3. Aufbau und Ansteuerung von Flash-Speicher
4. **Ausblick**

Betrachtung der Systemleistung

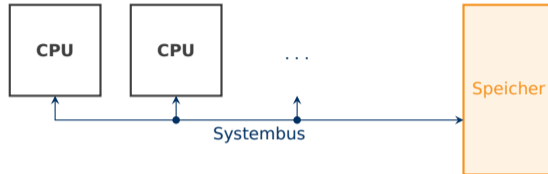
Seit 1980 wächst die Geschwindigkeit des ...

- Hauptspeichers um 7 % pro Jahr
- Prozessors um 50 % pro Jahr

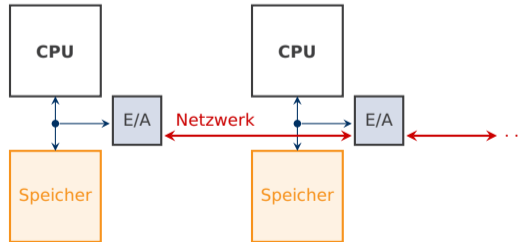


Speicherarchitekturen für Mehrprozessorsysteme

Shared Memory („gemeinsam genutzt“)



Distributed Memory („verteilt“)



Syllabus – Wintersemester 2021/22

06.10.21	1. Einführung
13.10.21	2. Kombinatorische Logik I
20.10.21	3. Kombinatorische Logik II
27.10.21	4. Sequenzielle Logik I
03.11.21	5. Sequenzielle Logik II
10.11.21	6. Arithmetik I
17.11.21	7. Arithmetik II
24.11.21	8. Befehlssatzarchitektur (ARM) I
01.12.21	9. Befehlssatzarchitektur (ARM) II
15.12.21	10. Ein-/Ausgabe
12.01.22	11. Prozessorarchitekturen
19.01.22	12. Speicher
26.01.22	13. Leistung
02.02.22	Klausur (1. Termin)