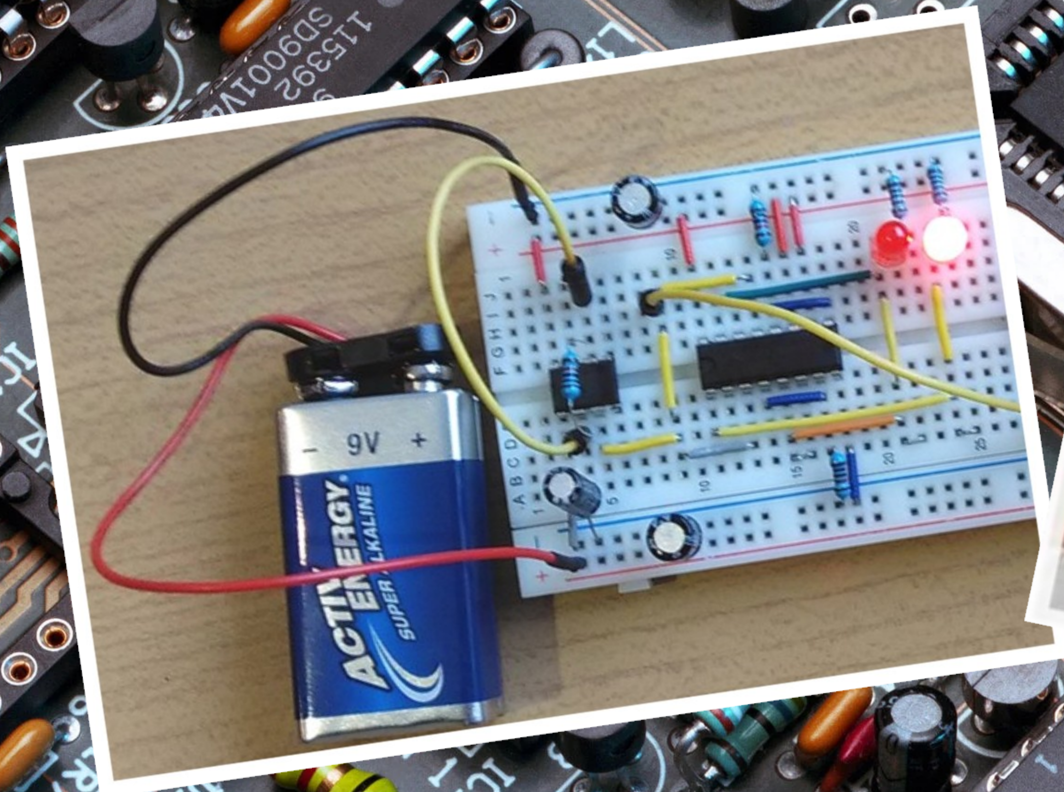
A digitális elektronika alapjai



1. Boole algebra, logikai függvények

Felhasznált és ajánlott irodalom

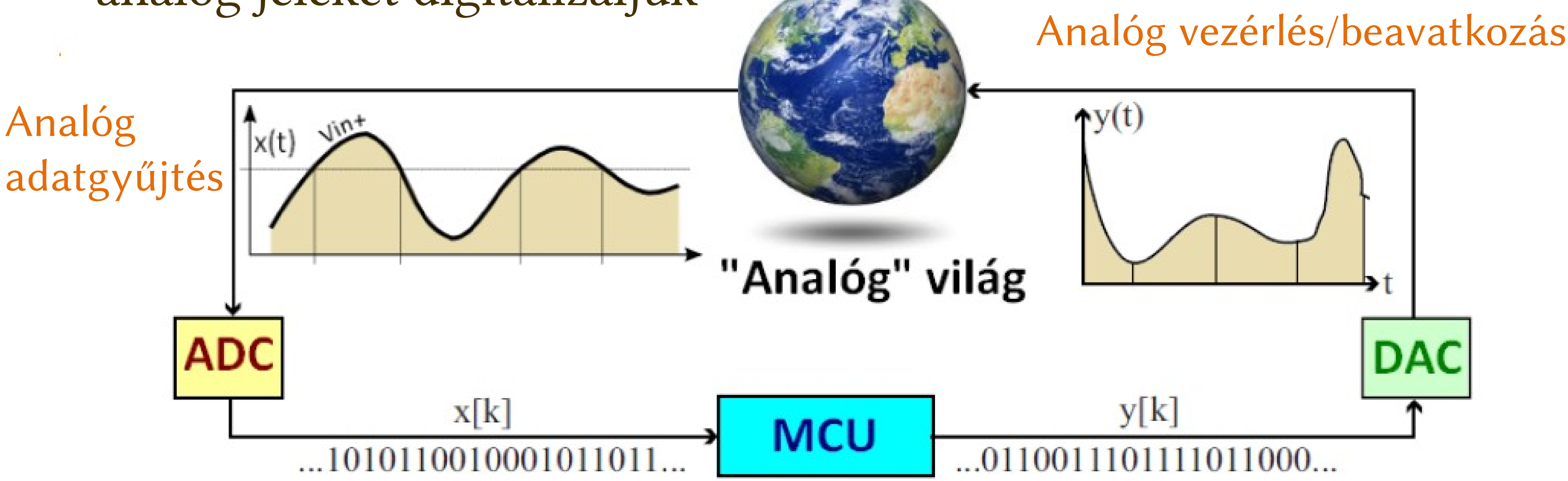
- Gulyás Dénes: Számítógép architektúrák *(interaktív jegyzet)*
- Mike Gábor: A digitális elektronika alapjai *(jegyzet és videók)*
- Zalotay Péter: Digitális technika
- Végh János: Ismerkedés a digitális elektronikával
- Mészáros Miklós: Logikai algebra alapjai, logikai függvények I.
- Mingesz Róbert: Digitális technikai tananyagok
- F-alpha.net: Digital Electronics
- Electronics Tutorials: Logic Gates
- M. Morris Mano and Michael D. Ciletti:
  Digital Design - With an Introduction to the Verilog HDL, 5th. Edition

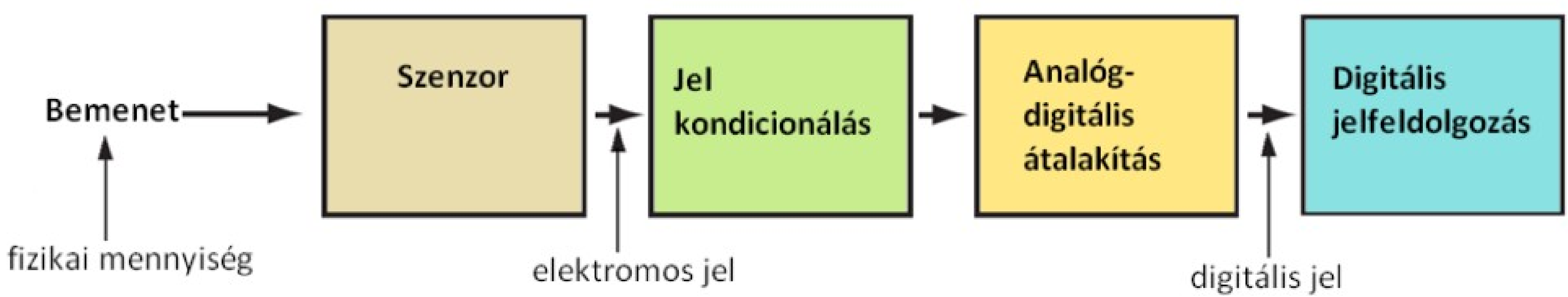
Logikai áramkör szimulátorok

- LogiSim szimulátor: www.cburch.com/logisim/
- Falstad.com: Circuit simulator
- CircuitVerse: Simulator
- University of Genoa: Deeds Simulator
- Gatecat: Breadboard Simulator v1.0
- Logic.ly: Logic.ly Simulator (online demo)

Analóg jelfeldolgozás

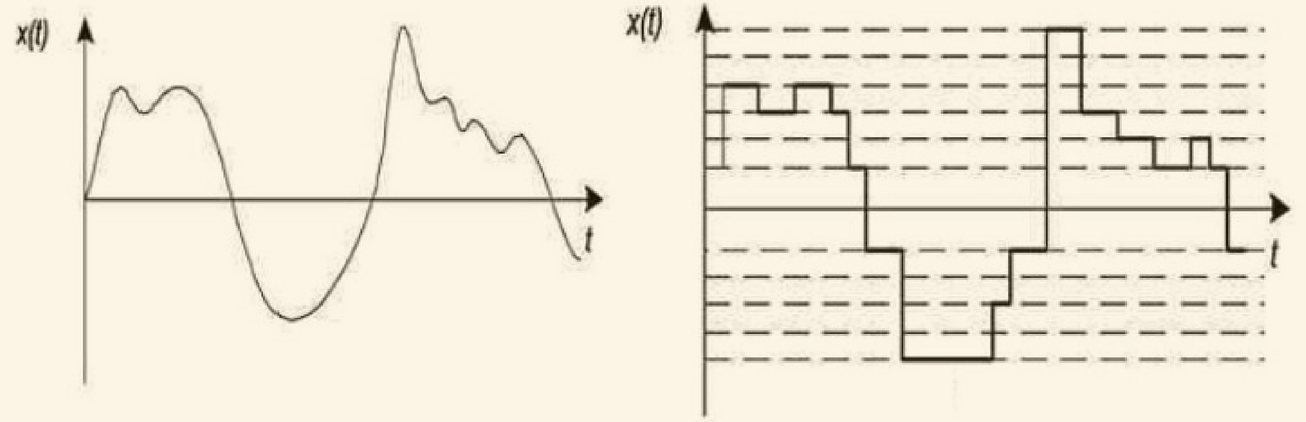
- Analóg világban élünk, de a jelfeldolgozás sokszor digitális rendszerekkel (kéziműszer, mikrovezérlő, számítógép) történik, ezért az analóg jeleket digitalizáljuk





Analóg, diszkrét és digitális jelek

- **Az analóg jel** az idő folytonos függvénye, s a mérhető jel az érzékelt fizikai mennyiséggel arányos (pl. termopár feszültsége a hőmérséklettel, a fotoellenállás ellenállása pedig a megvilágítással arányos)
- **A digitális jel** az analóg jel diszkrét értékhatárokra kerekített, egy rövid időtartományra nézve állandónak tekintett értéke, amely így az időnek lépcsős függvénye (mind az értelmezés tartomány, mind az értékkészlet diszkrét, számjegyekkel leírható)

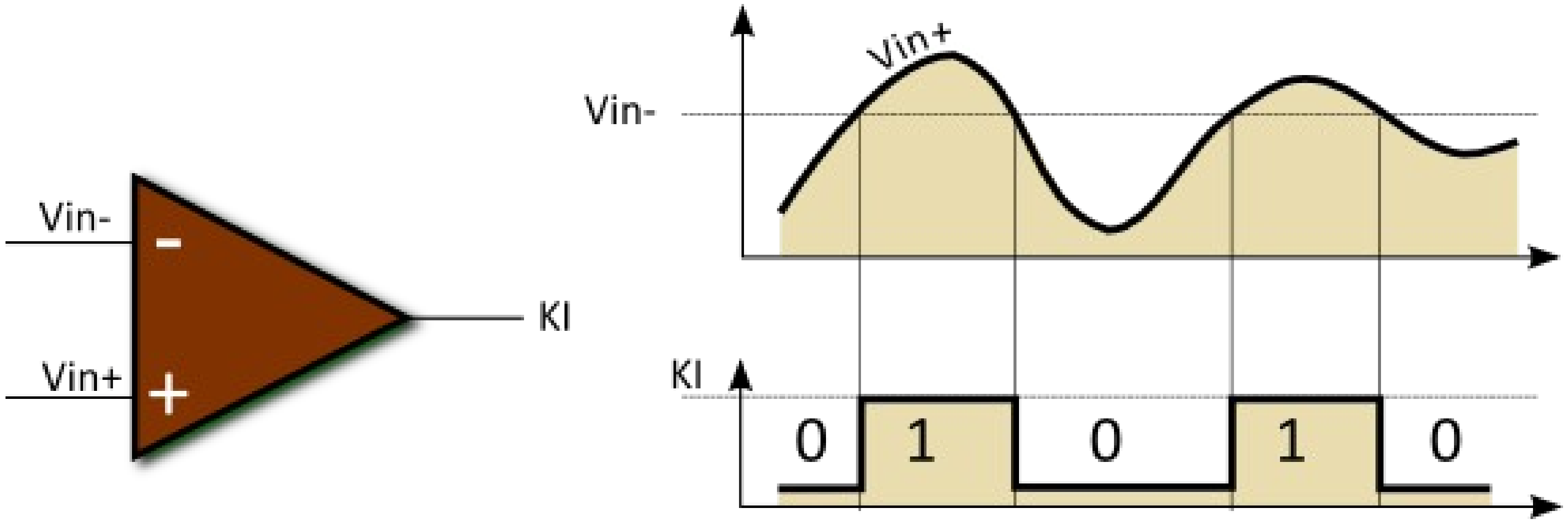


analóg jel | diszkrét v. digitális jel

- **A bináris jel** a digitális jelek egyik fajtája, melynek értékkészlete csupán két elemet tartalmaz: 0 és 1

Analóg jelek digitalizálása

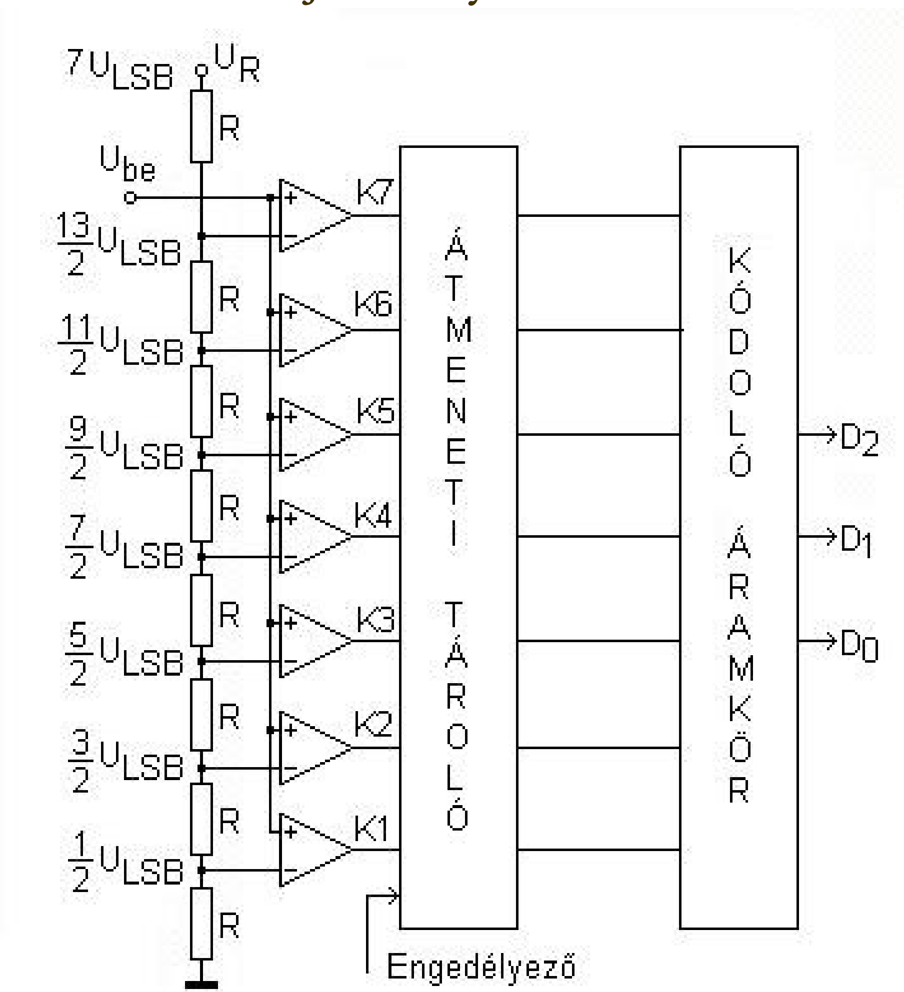
- Az analóg jel digitálissá alakításának a legegyszerűbb esete az analóg komparátorral végzett összehasonlítás. Ennek során két analóg értéket hasonlítunk össze, de az összehasonlítás eredménye már digitális (sőt, bináris, azaz csak két értéket vehet fel)
- Megjegyezzük, hogy az ábrán látható 1 és 0 csupán szimbólumok, fizikai reprezentációjuk itt jól megkülönböztethető magasabb, illetve alacsonyabb kimeneti feszültség



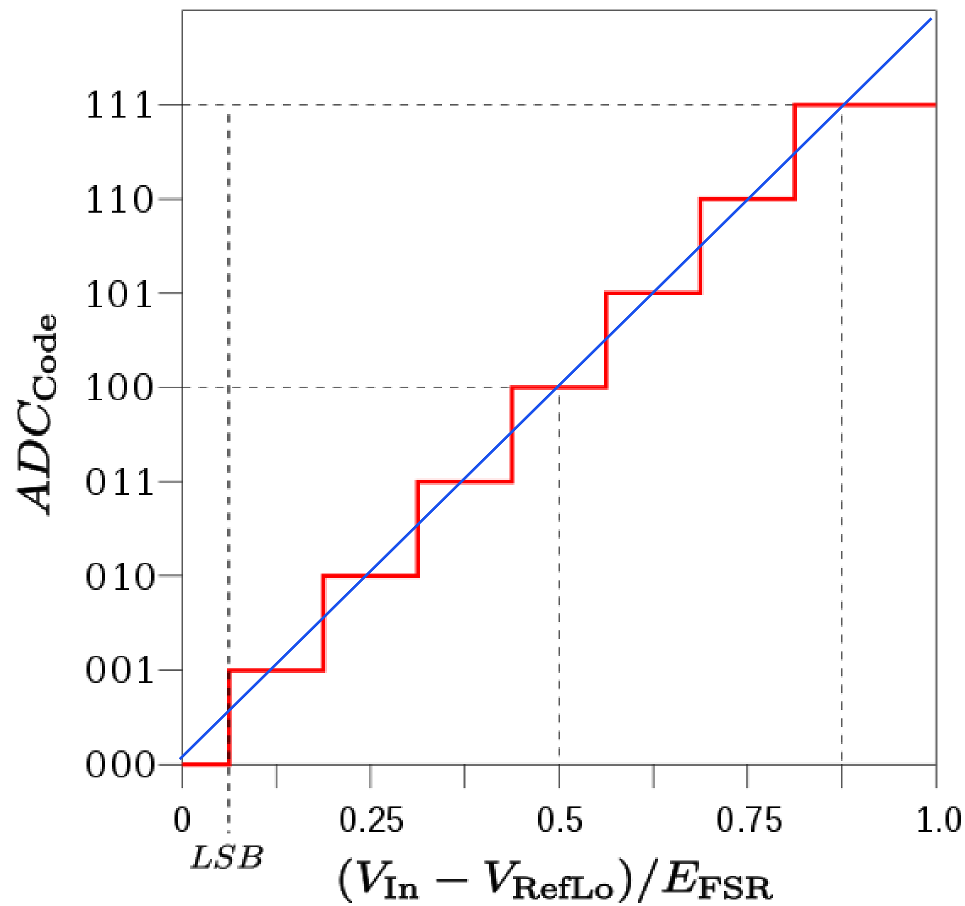
Az analóg komparátor működésének szemléltetése állandó Vin- jelszint esetén

Analóg jelek digitalizálása

- Az analóg jel digitálissá alakításának bonyolultabb esete az **analóg-digitális átalakító** (ADC – Analog-Digital Converter) alkalmazása, amikor a mérendő jel értéktartományát sok (2^3 – 2^{24}) diszkrét szintre bontjuk, s azt keressük, hogy a mérendő jel melyik szinthez áll a legközelebb



Egy 3-bites ADC
ideális átviteli függvénye



Logikai áramkörök

- Számítógépekben, műszerekben, vezérlő automatákban alapvető szerep jut az olyan áramköröknek, melyek valamilyen logikai összefüggést fejeznek ki. Ezeknek a **logikai áramköröknek** az építőkövei az úgynevezett kapuáramkörök, amelyek egy-egy elemi logikai összefüggés (**NEM, ÉS,** illetve **VAGY** kapcsolat) kiértékelésére képesek
- A **logikai áramkörök** tervezésénél az a cél, hogy bizonyos események bekövetkezésénél az áramkör meghatározott módon vezéreljen valamilyen eszközt. Például a lift induljon felfelé, ha a liftben megnyomtak egy magasabb emeletnek megfelelő gombot, vagy ha egy felsőbb emeleten megnyomták a hívógombot, de ne induljon el, ha az ajtó nyitva van, stb.
- Az eseményeket, melyek bekövetkeznek vagy nem, és a bekövetkezésükre utaló állításokat, melyek igazak vagy hamisak, **logikai változóknak** tekintjük, melyeknek két lehetséges értékét 1 és 0 *szimbólummal* jelöljük
- A **logikai változó értéke** 1, ha az esemény bekövetkezik, vagy ha az állítás igaz, és 0 az ellenkező esetben. A logikai áramkörökben többnyire a feszültség magas, illetve alacsony szintje képviseli az 1 vagy 0 állapotot, de a logikai 1 és 0 számtalan más módon is reprezentálható

Boole-algebra

- A **Boole-algebra** egy olyan kétműveletes algebrai struktúra amely a **halmazműveletek,** a **logikai műveletek** és az **eseményalgebra** műveleteinek közös tulajdonságaival rendelkezik. **George Boole** angol matematikus mutatott rá először arra (1854), hogy a fenti három terület közötti szoros, algebrai jellegű kapcsolat áll fenn
- A **Boole-algebra** megadható közös tulajdonságokkal bíró elemek egy halmazával, a halmazelemeken végezhető műveletekkel és néhány **axiómával** vagy **posztulátummal,** amely bizonyos követelményeket támasztanak a halmazra és a halmazelemeken végezhető műveletekre nézve. A **posztulátum** szó jelentése: követelmény, kívánalom, saroktétel, alapigazság, elmélet kiindulási pontja
- Többféle **Boole-algebra** definiálható. Bennünket csak az ún. kétértékű Boole-algebra érdekel, amelyet **kapcsolási algebrának** is neveznek. Ez azt vizsgálja, hogy a logikai kapuáramkörökből összeállított hálózat kimenetén a lehetséges két állapot melyike valósul meg, ha a bemenetek az egyik vagy másik lehetséges állapotban vannak. A **Boole-algebra** tehát az elektronikus digitális számítógép tervezésének nélkülözhetetlen elméleti alapja

A Boole algebra az alábbi axiómákra épül:

1. Az algebra **kétértékű elemek halmazára** értelmezett

2. A halmaz minden elemének létezik **komplemense,** amely szintén eleme a kétértékű elemek halmazának

3. Az elemek között végezhető műveletek a **konjunkció** (logikai ÉS, logikai *„szorzás”: ’·’*), illetve a **diszjunkció** (logikai VAGY, logikai *„összeadás”: ’+’*)

és a műveletek eredménye is eleme a kétértékű elemek halmazának

4. A struktúra a logikai műveletekre nézve legyen:

Kommutatív - a tényezők felcserélhetők: $x+y = y+x$; $x \cdot y = y \cdot x$

Asszociatív - a tényezők csoportosíthatók:

$x + (y + z) = (y + y) + z$; $x \cdot (y \cdot z) = (y \cdot x) \cdot z$

Disztributív (a két művelet elvégzésének sorrendje felcserélhető)

$x \cdot (y + z) = x \cdot y + x \cdot z$; $x + y \cdot z = (x+y) \cdot (x + z)$

magyarázat: $x + y \cdot x + x \cdot z = x$
lásd: abszorpciós tétel

5. A halmaz kitüntetett elemei:

egység elem (1) - értéke a halmazon belül mindig IGAZ

nulla elem (0) - értéke a halmazon belül mindig HAMIS

A 0 és 1 itt nem számok, hanem szimbólumok!

A Boole-algebra műveletei

- A kétértékű Boole-algebra bináris (kétváltozós) műveleteinek eredménye a **B** = {0,1} halmaz valamelyik eleme lesz, a műveletben szereplő két logikai változó értékétől függően. A műveletvégzés szabályait táblázatos formában is megadhatjuk.

Igazságtáblázat

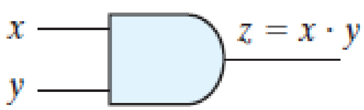
x	y	$x \cdot y$
0	0	0
0	1	0
1	0	0
1	1	1

x	y	$x + y$
0	0	0
0	1	1
1	0	1
1	1	1

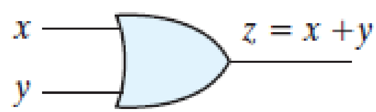
x	x'
0	1
1	0

A 0 és 1 itt nem számok, hanem szimbólumok!

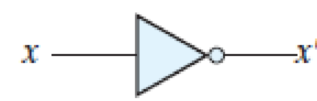
Logikai kapu rajzjele



Kétbemenetű ÉS kapu



Kétbemenetű VAGY kapu

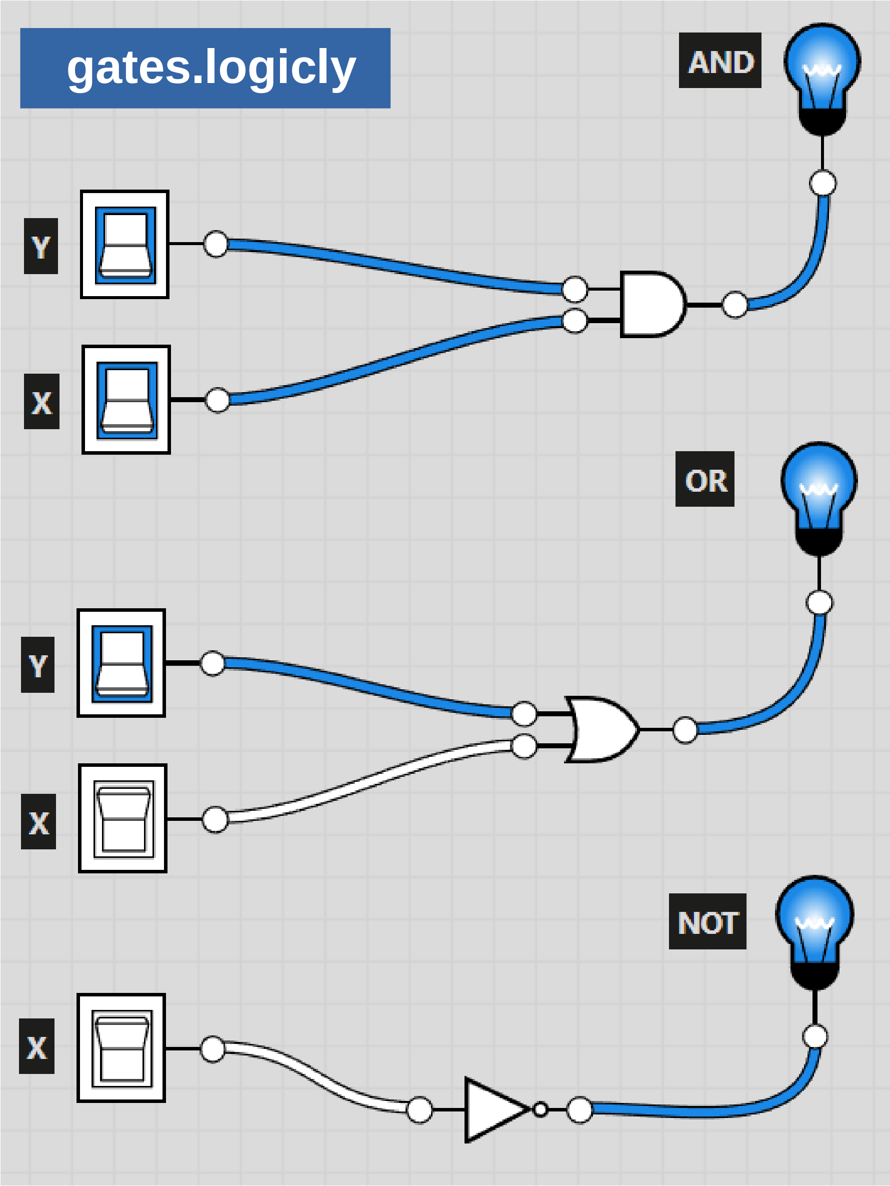


NEM kapu (inverter)

- Az ábrán szereplő harmadik művelet a 2. axiómában definiált komplemens előállítására szolgál
- A logikai áramkörök építőkövei az úgynevezett kapuáramkörök, amelyek egy-egy elemi logikai művelet (NEM, ÉS, VAGY kapcsolat) elvégzésére képesek. A logikai áramköröknél a „0” pl. alacsony jelszinttel, az „1” pedig magas jelszinttel reprezentálható
- Egy logikai kifejezés több, különböző műveletet is tartalmazhat, ekkor a műveleti sorrend: 1. Zárójel, 2. Negáció (NEM), 3. ÉS művelet, 4. VAGY művelet

Egy jó játék: logic.ly

- Vizsgáljuk meg az alapműveletek igazságtáblázatát!



x	y	x·y
0	0	0
0	1	0
1	0	0
1	1	1

x	y	x + y
0	0	0
0	1	1
1	0	1
1	1	1

x	x’
0	1
1	0

Tételek és tulajdonságok

- Az axiómákból és a műveleti táblázatokból újabb összefüggéseket vezethetünk le:
- **Dualitás elve:** Az összefüggéseket (a) és (b) párok formájában adtuk meg a + és · műveletekre. Egyikből megkaphatjuk a másikat, ha a **+** és **·** műveleteket felcseréljük, valamint a 0 helyébe 1-et, illetve az 1 helyébe 0-t írunk. Ez általános tulajdonsága a **Boole-algebrának,** a levezetett tételekre és a levezetés lépéseire is igaz
- **Alaptételek**
  1) **Idempotencia:** (a) $\mathbf{x + x = x}$ és (b) $x \cdot x = x$
  2) **Korlátosság:** (a) $\mathbf{x + 1 = 1}$ és (b) $x \cdot 0 = 0$
  3) **Involúció:** $\mathbf{(x')' = x}$
  4) **Asszociativitás:** (a) $\mathbf{x + (y + z) = (x + y) + z}$ és (b) $\mathbf{x \cdot (y \cdot z) = (x \cdot y) \cdot z}$
  5) **De Morgan azonosságok:** (a) $\mathbf{(x + y)' = x' \cdot y'}$ és (b) $\mathbf{(x \cdot y)' = x' + y'}$
  6) **Abszorpció:** (a) $\mathbf{x + (x \cdot y) = x}$ és (b) $\mathbf{x \cdot (x + y) = x}$

A Boole-algebra azonosságai

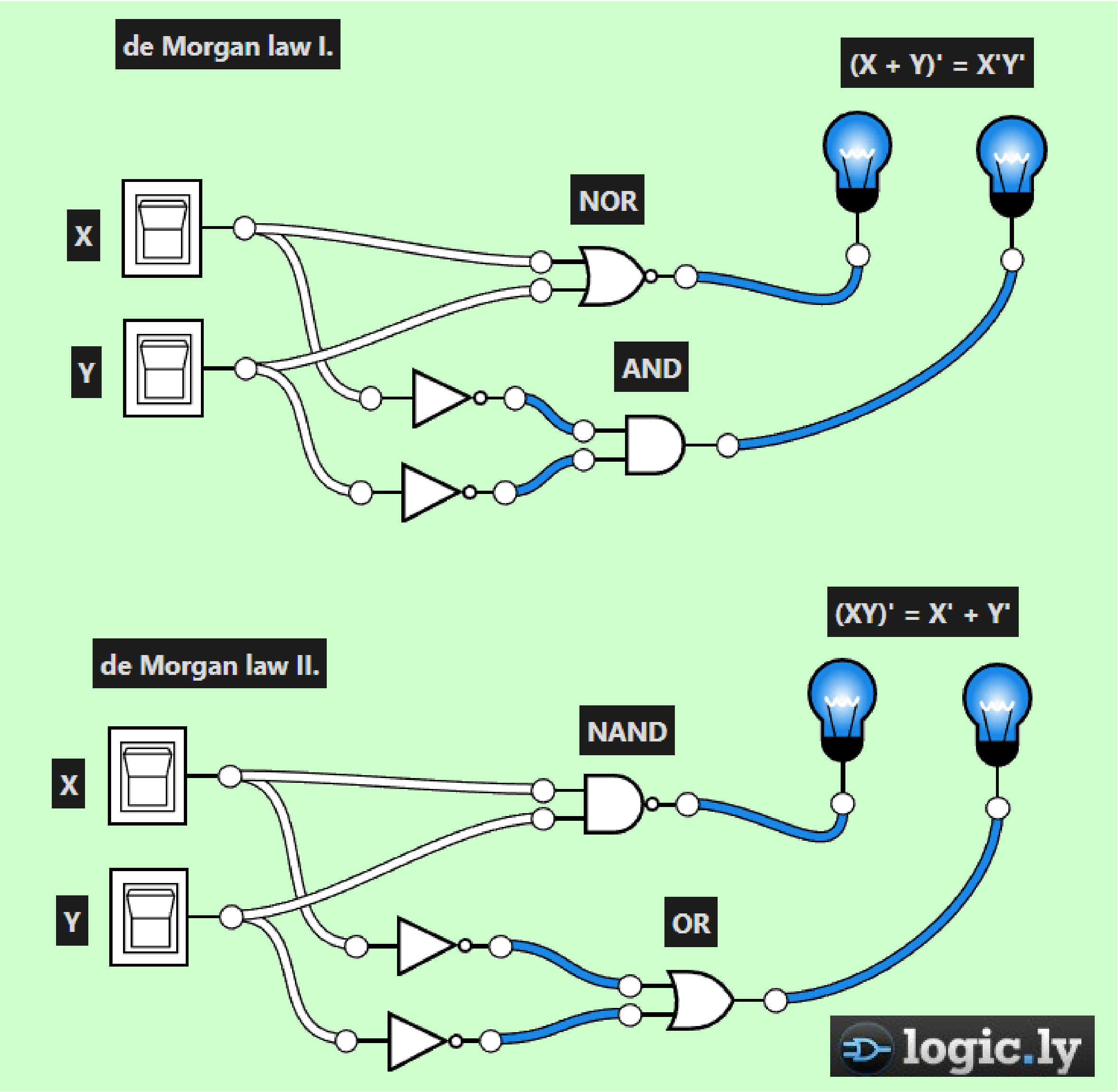
- A Boole-algebrában az azonos átalakításokat az axiómák és az előző oldalon bemutatott alaptételek alapján felírható alábbi azonosságok szerint végezhetjük (ezeket is duális páronként adtuk meg)

5. axióma	(a)	$x + 0 = x$	(b)	$x \cdot 1 = x$
2. axióma	(a)	$x + x' = 1$	(b)	$x \cdot x' = 0$
Idempotencia	(a)	$x + x = x$	(b)	$x \cdot x = x$
Korlátosság	(a)	$x + 1 = 1$	(b)	$x \cdot 0 = 0$
Involúció		$(x')' = x$		
Kommutativitás	(a)	$x + y = y + x$	(b)	$xy = yx$
Asszociativitás	(a)	$x + (y + z) = (x + y) + z$	(b)	$x(yz) = (xy)z$
Disztributivitás	(a)	$x(y + z) = xy + xz$	(b)	$x + yz = (x + y)(x + z)$
De Morgan tétel	(a)	$(x + y)' = x'y'$	(b)	$(xy)' = x' + y'$
Abszorpció	(a)	$x + xy = x$	(b)	$x(x + y) = x$

Ahol nem zavaró, ott a logikai szorzás jelét elhagytuk!

De Morgan tételek

Igazságtáblázattal igazoljuk, hogy: (x + y)’ = x’· y’ és (x·y)’ = x’+ y’

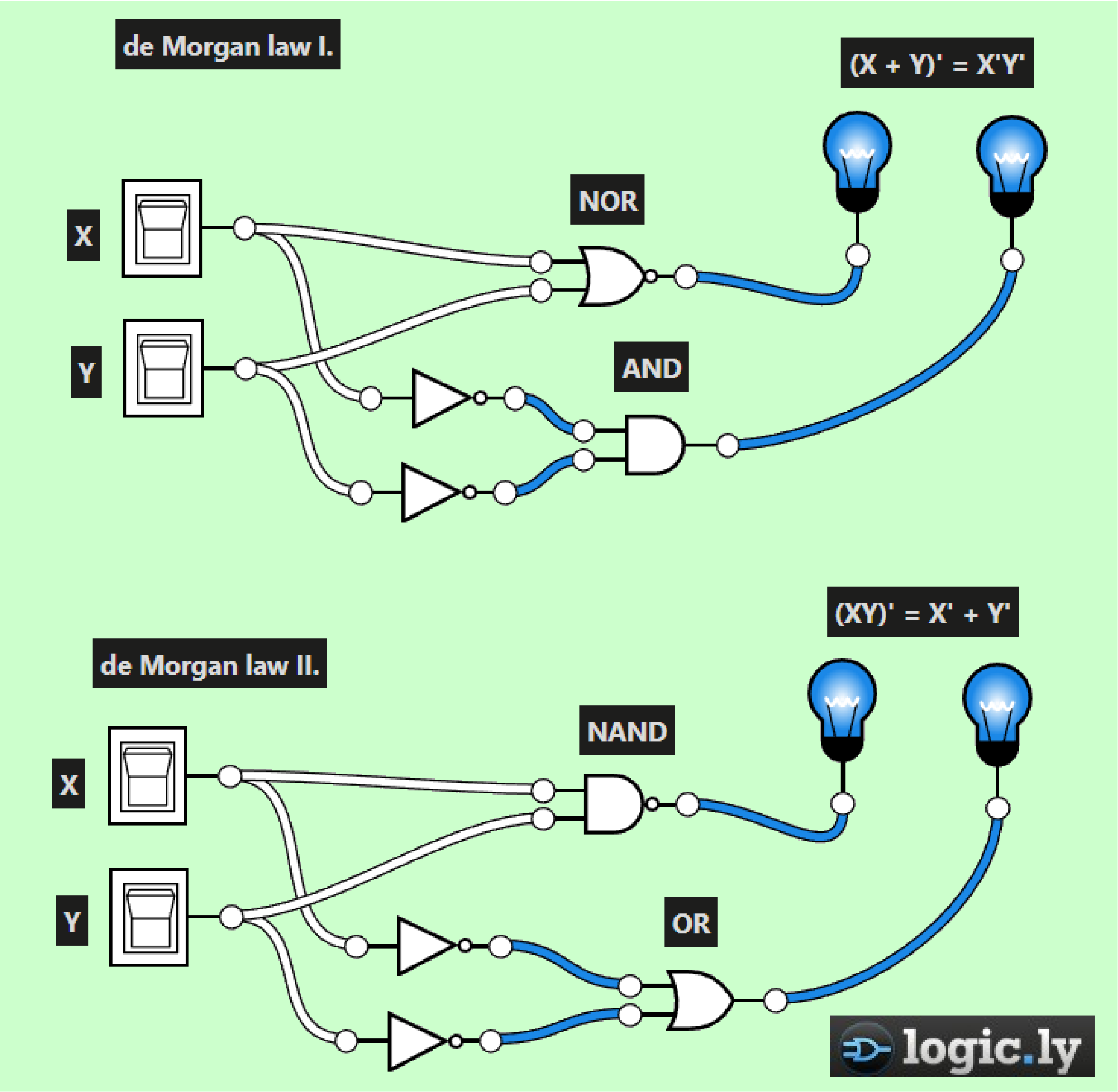


x	y	(x + y)’	x’· y’
0	0		
0	1		
1	0		
1	1		

x	y	(x·y)’	x’+ y’
0	0		
0	1		
1	0		
1	1		

De Morgan tételek

Igazságtáblázattal igazoljuk, hogy: $(x + y)' = x' \cdot y'$ és $(x \cdot y)' = x' + y'$

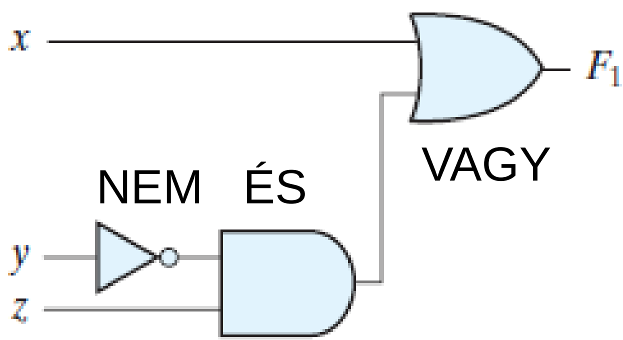


x	y	(x + y)’	x’· y’
0	0	1	1
0	1	0	0
1	0	0	0
1	1	0	0

x	y	(x·y)’	x’+ y’
0	0	1	1
0	1	1	1
1	0	1	1
1	1	0	0

Logikai függvények

- **Logikai függvény**en olyan algebrai kifejezéseket értünk, amelyek bináris (kétértékű) változókból, a 0 és 1 konstansokból és logikai műveleti jelekből állnak. A bináris változók adott értékénél a függvény értéke 0 vagy 1 lesz.
- Például : $\mathbf{F_1 = x + y' \cdot z}$
- Az $\mathbf{F_1}$ értéke 1 lesz, ha x = 1, vagy ha **y'** és **z** egyaránt 1. Minden más esetben $\mathbf{F_1}$ értéke 0 lesz. A komplemensképzés szabályai szerint akkor lesz y' = 1, amikor y = 0. Tehát $\mathbf{F_1}$ értéke akkor lesz 1, ha **x = 1** vagy ha **y = 0** és **z = 1.**
- Egy **logikai függvény** megadható az igazságtáblázatával is, illetve az algebrai kifejezés megfelelően összekapcsolt logikai kapuk hálózatával is reprezentálható (minden műveletnek egy kapu felel meg, a változók kapubemenetet jelentenek, a kifejezés értéke pedig a kimeneten jelenik meg)



($F_1 = x + y'z$)

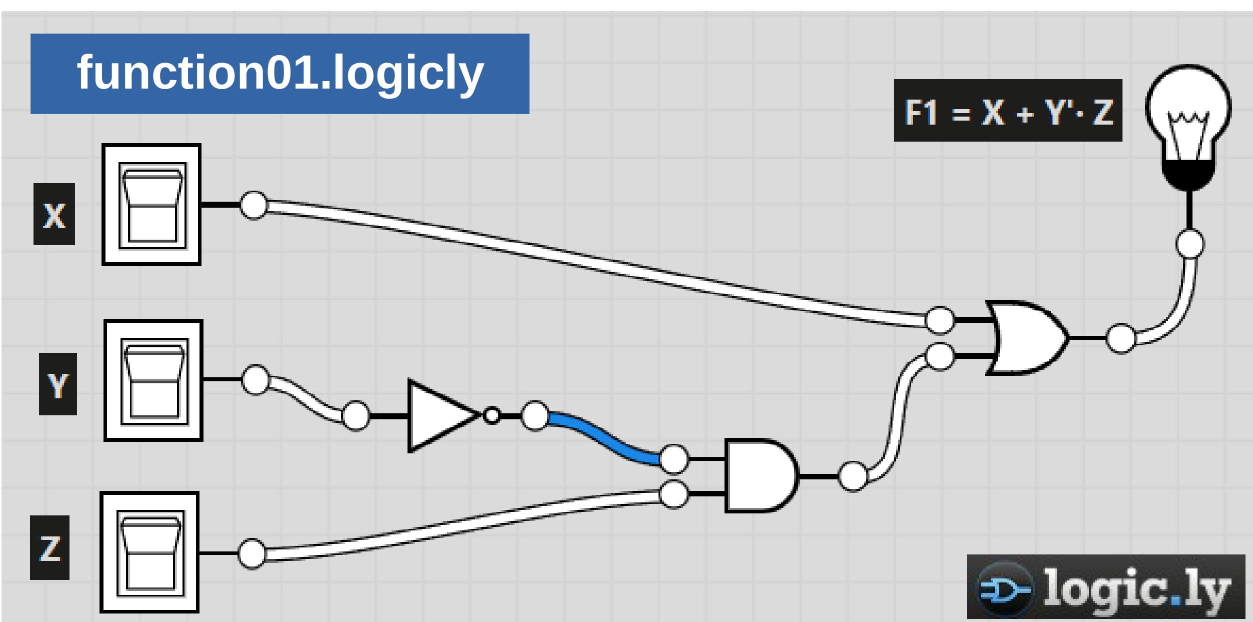
x	y	z	F_1
0	0	0	0
0	0	1	1
0	1	0	0
0	1	1	0
1	0	0	1
1	0	1	1
1	1	0	1
1	1	1	1

- A **logikai áramkörök**nél a függvény változói bemenetként szerepelnek, az $\mathbf{F_1}$ értékét pedig az áramkör kimenete jelenti

Logikai függvények

- Modellezzük az előző oldali $\mathbf{F_1 = x + y' \cdot z}$ függvényt a Logic.ly programmal és ellenőrizzük a függvény igazságtáblázatát!
- A kapcsolók kézi állítgatása helyett használhatjuk a **Logic.ly** program „Generate Truth Table” gombját is
- Az igazságtáblázatot kijelöléssel kérhetjük részáramkörre vagy a kapcsolás egészére

x	y	z	x + y’· z
0	0	0	0
0	0	1	1
0	1	0	0
0	1	1	0
1	0	0	1
1	0	0	1
1	1	0	1
1	1	1	1



Truth Table

I1	I2	I3	O1
false	false	false	false
false	false	true	true
false	true	false	false
false	true	true	false
true	false	false	true
true	false	true	true
true	true	false	true
true	true	true	true

Logikai függvények egyszerűsítése

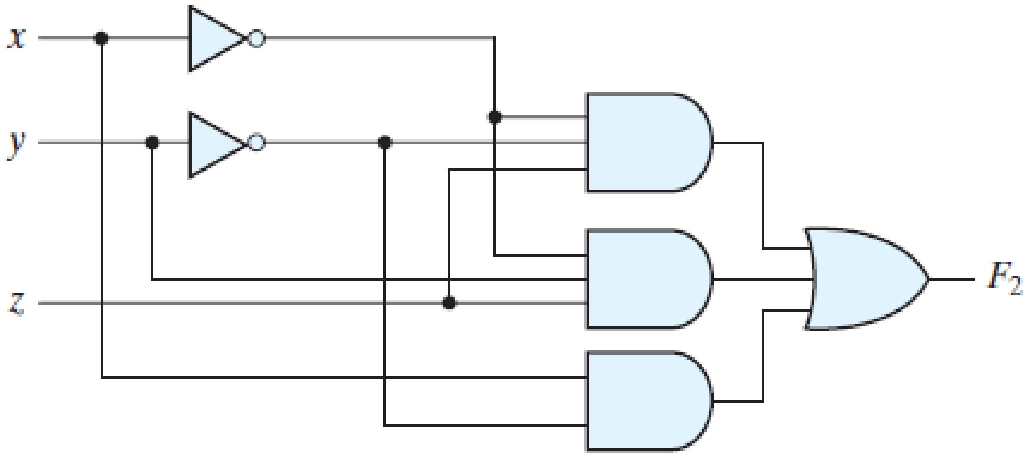
- Az **igazságtáblázattal** egy logikai függvényt csak **egyféleképpen** fejezhetünk ki. **Algebrai formulával** azonban **többféle módon** is megadhatjuk a függvényt úgy, hogy minden alak ugyanarra az eredményre vezessen. Minden egyes formula megfelel egy-egy logikai kapukból kialakított kapcsolásnak.
- Ez az, ami a **Boole-algebra** használatára ösztönöz bennünket. A logikai függvényeknek a **Boole-algebra** szabályait követő átalakítása sok esetben hozzásegít bennünket, hogy egyszerűbb kifejezéssel írjuk fel ugyanazt a függvényt, ezáltal kevesebb kapuval vagy kevesebb bemenetű kapuáram-körökkel valósíthatjuk meg az áramkört.
- Tekintsük például a következő logikai függvényt: $\mathbf{F_2 = x'y'z + x'yz + xy'}$
- Most egyszerűsítsük a kifejezést a **Boole-algebra** azonosságainak felhasználásával:

$$F_2 = x'y'z + x'yz + xy' = x'z\overbrace{(y' + y)}^{1} + xy' = x'z + xy'$$

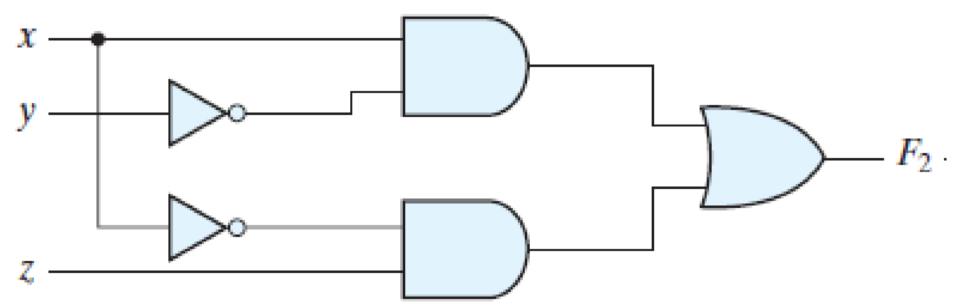
- A függvényt leíró kifejezés két tagra egyszerűsödött, ami egyszerűbb áramköri megvalósítást is jelent

Logikai hálózatok egyszerűsítése

- Az előző oldalon bemutatott függvény eredeti és egyszerűsített alakjának áramköri megvalósítása az alábbi ábrákon látható
- Nyilvánvalóan az a kedvezőbb megvalósítás, amelyik kevesebb kaput és kevesebb kapubemenetet igényel, mivel az kevesebb alkatrészből és kevesebb vezetékezéssel kivitelezhető
- Általában egy-egy logikai függvénynek sokféle megvalósítása lehet. A leggazdaságosabb megvalósítás megtalálása fontos része a tervezésnek

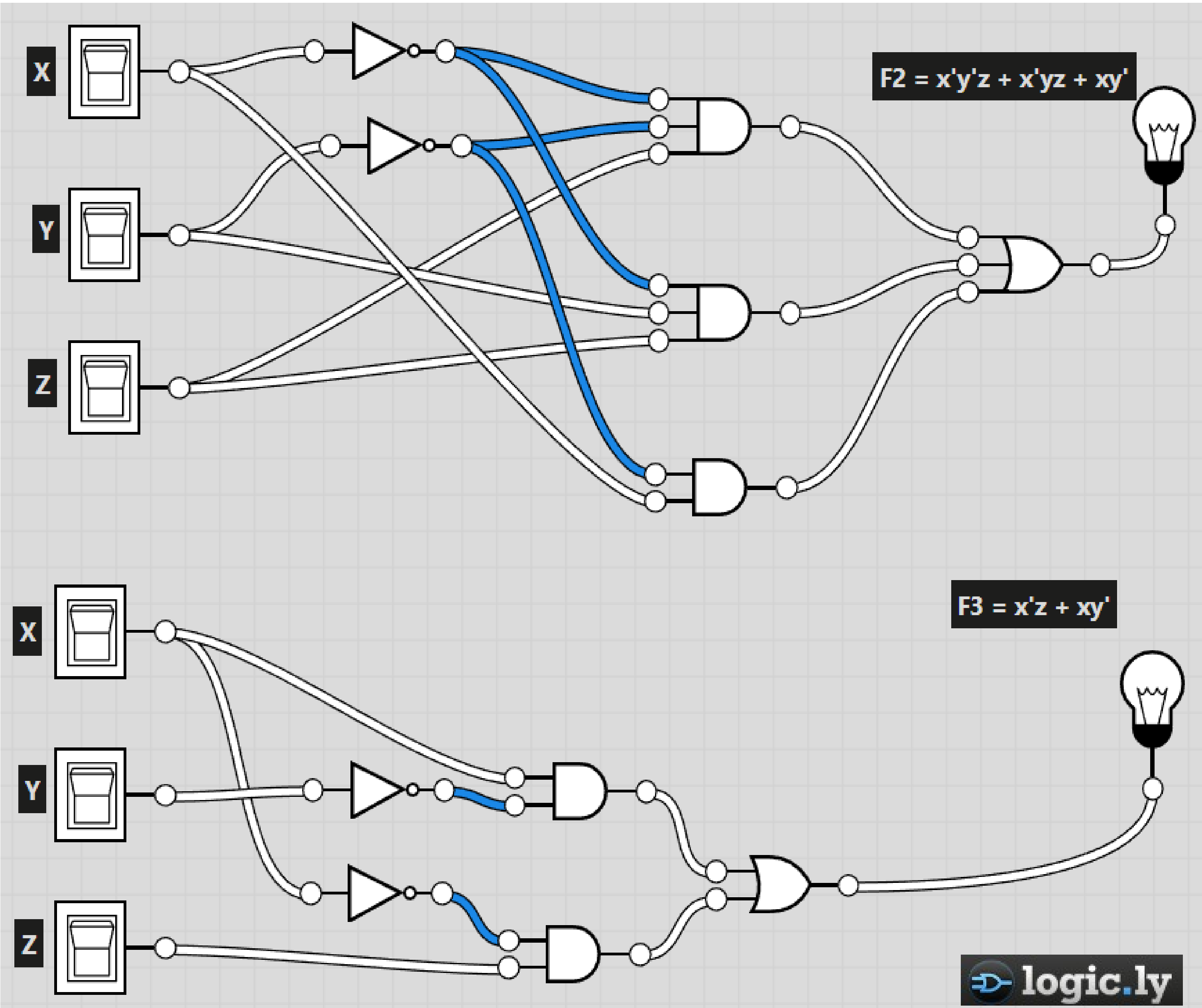


(a) $F_2 = x'y'z + x'yz + xy'$



(b) $F_2 = xy' + x'z$

Ellenőrizzük a két megvalósítás azonosságát!

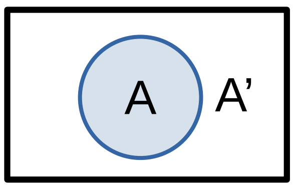


x	y	z	F2	F3
0	0	0	0	0
0	0	1	1	1
0	1	0	0	0
0	1	1	1	1
1	0	0	1	1
1	0	0	1	1
1	1	0	0	0
1	1	1	0	0

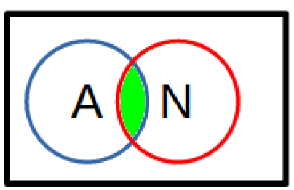
Mi mindenre jó a Boole algebra!

Halmazelmélet

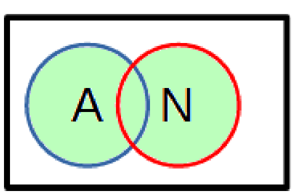
Osztálylétszám = 40, ebből
25-en angolt tanulnak,
22-en németet tanulnak.
Heten két nyelvet is tanulnak.



NEM A
komplemens



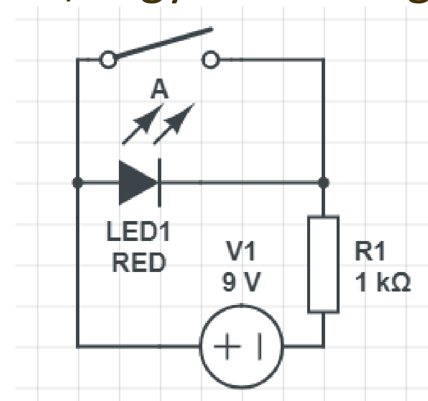
A ∩ N
metszet



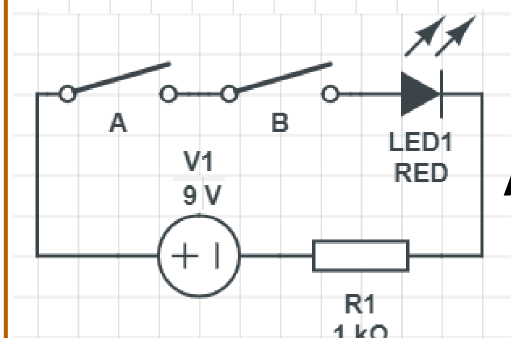
A ∪ N
unió

Kapcsolási logika

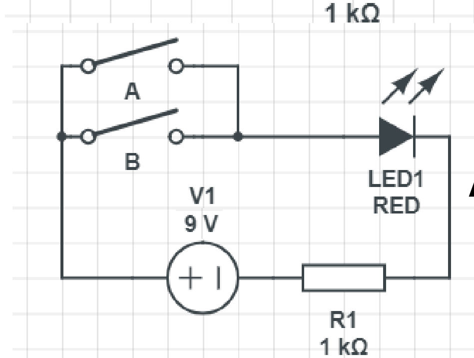
Igaz esemény, ha a kapcsoló zár, vagy a LED világít



NEM A



A ÉS B



A VAGY B

Eseményalgebra

Dobókockával gurítunk (x)
A = {2, 4, 6}, B = {4,5,6}
(x páros) (x > 3)

NEM A, ha x ∈ A’ = {1, 3, 5}

A ÉS B, ha x ∈ A és x ∈ B

A = {2, 4, 6} tehát ha
B = {5, 4, 6} x ∈ {4, 6}

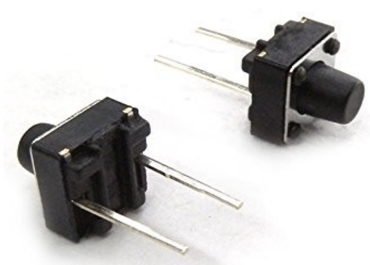
A VAGY B, ha x ∈ A vagy x ∈ B

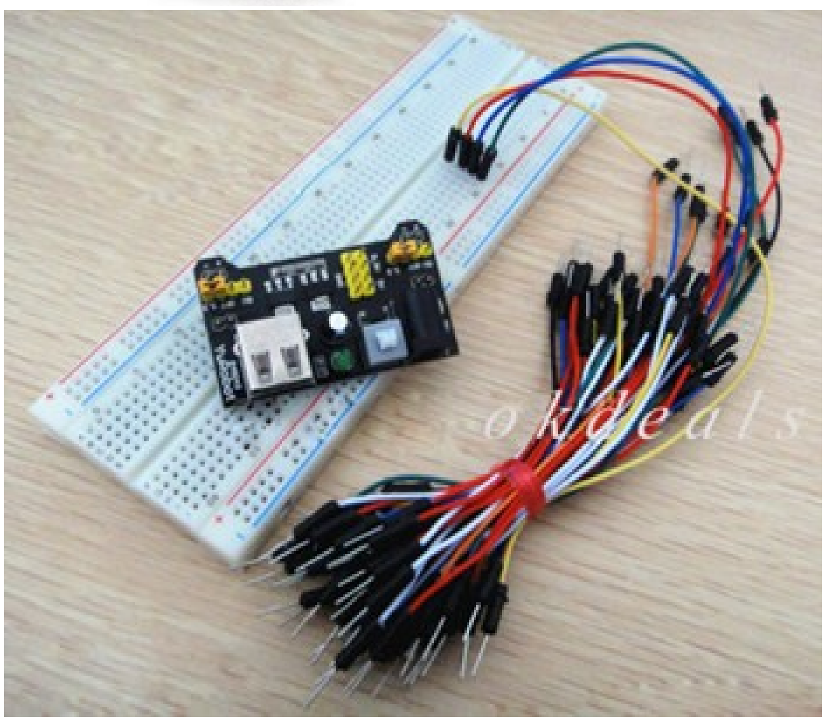
A = {2, 4, 6 }; B = {4, 5, 6 }

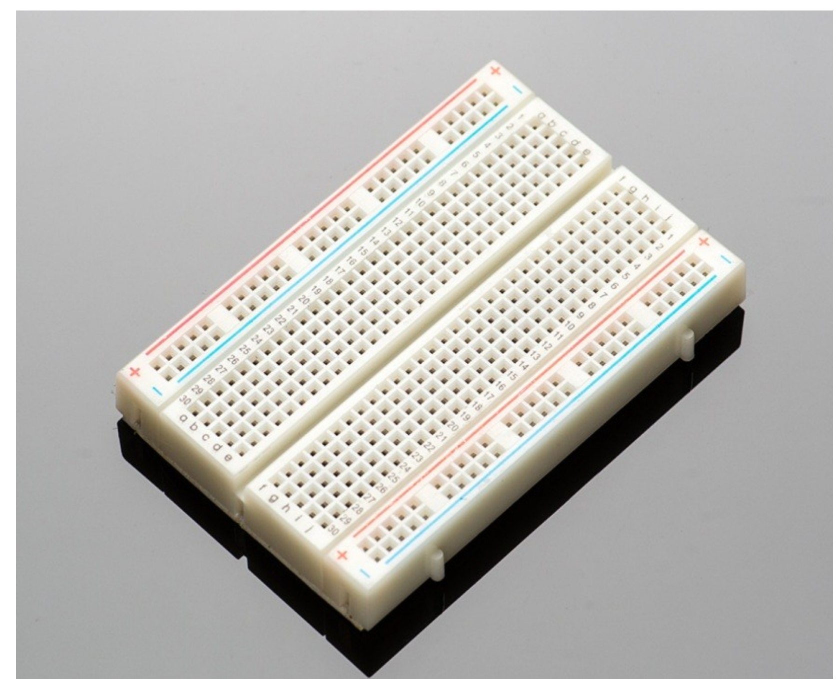
tehát ha x ∈ {2. 4, 5, 6}

A kísérletezés eszközei

- Az áramkörépítés egy dugaszolható próbapanelon a legegyszerűbb
- Tápellátás: 9 V-os elem

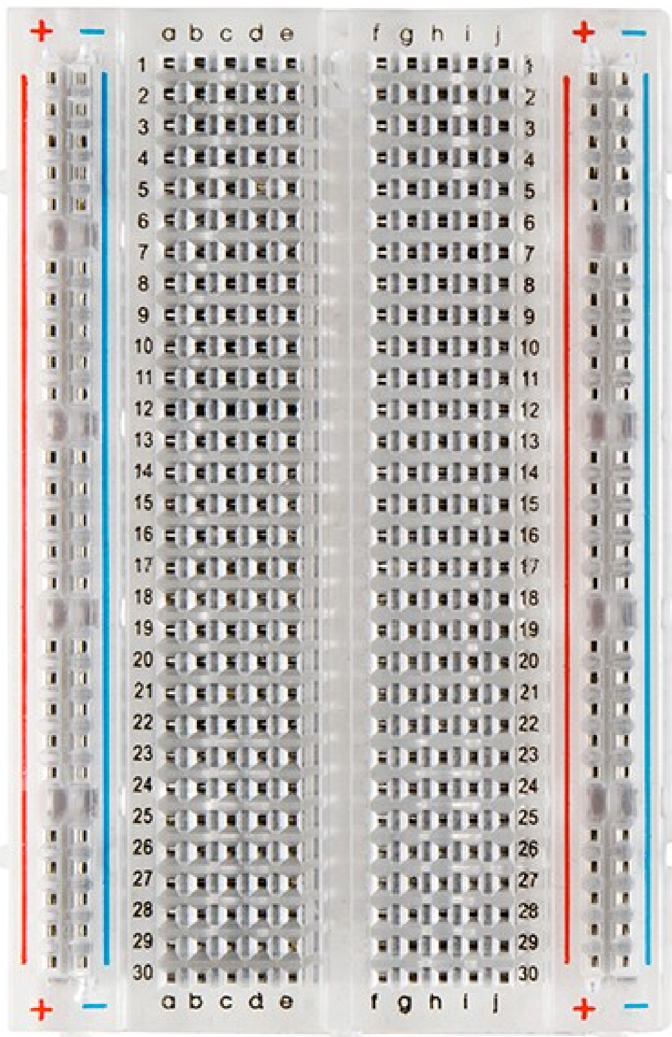


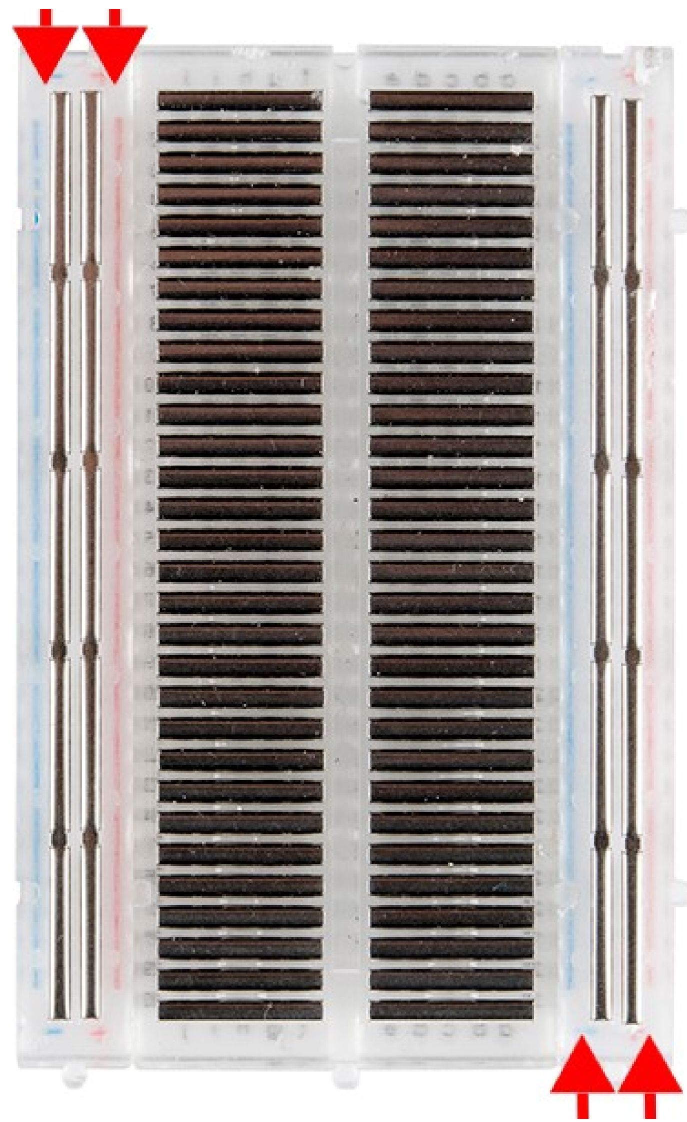


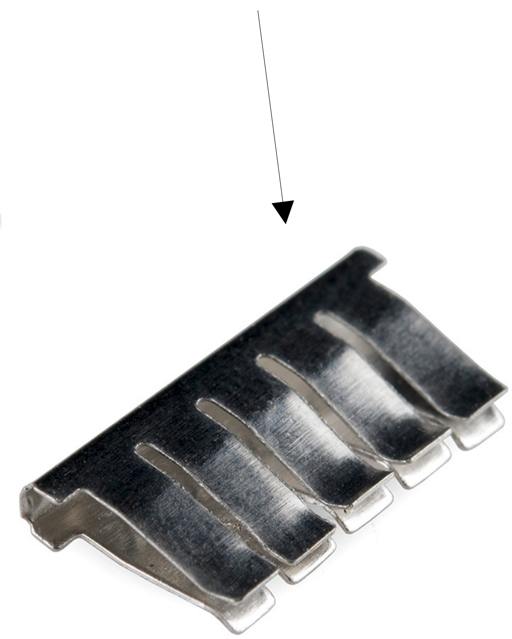


A dugaszolós próbapanel „titkai”

- A tápfeszültség sínek hosszanti irányban vannak összekötve, a többi csatlakozópont pedig ötösével keresztirányban van összekötve



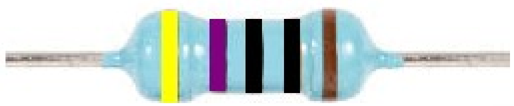




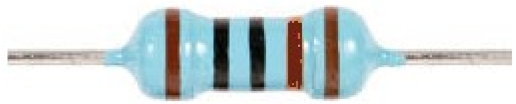
Ellenállások

- Színkódtábla segítségével olvashatjuk le az ellenállások értékét

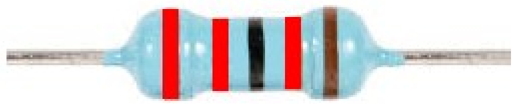
470 Ω 1%

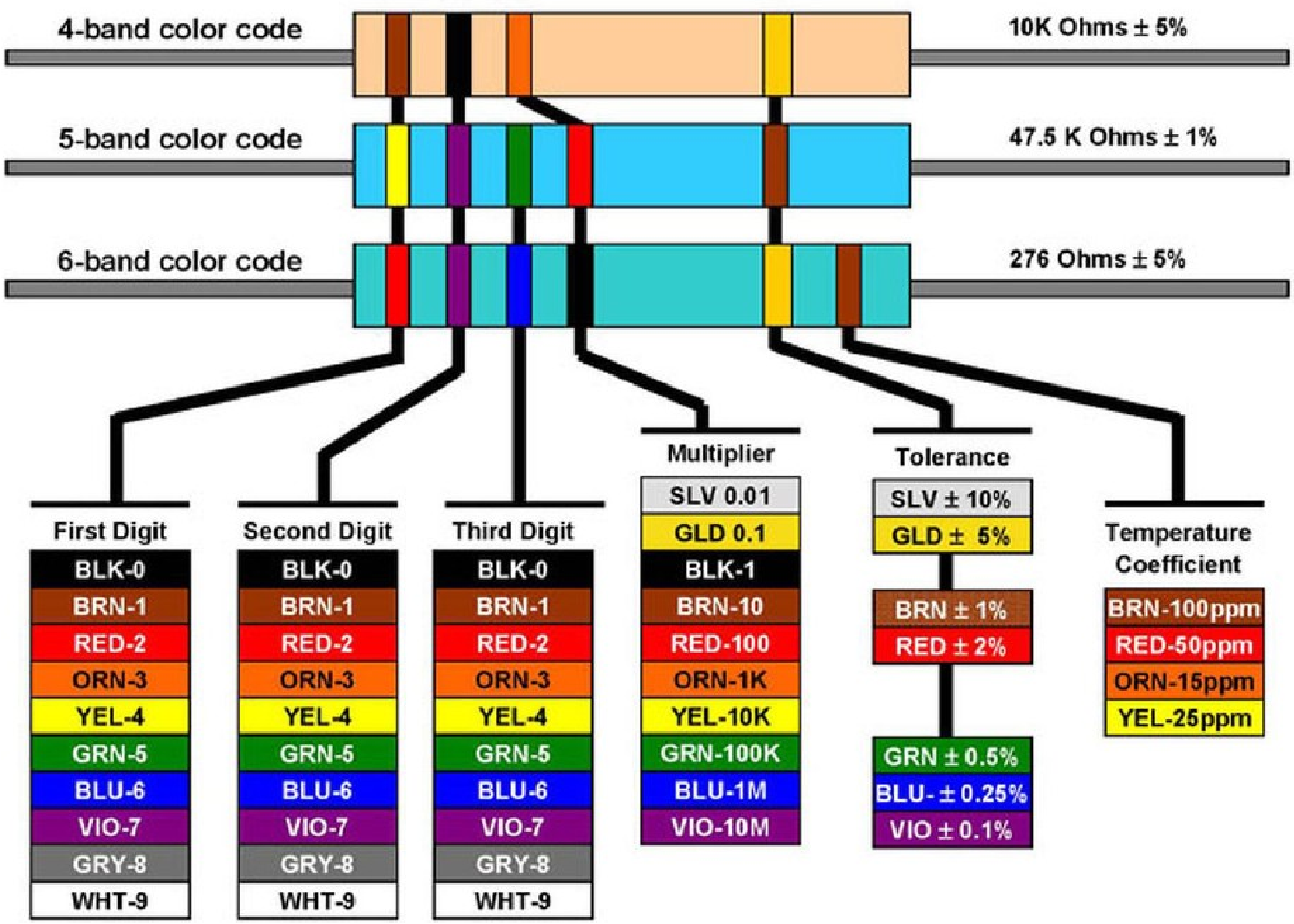


1 kΩ 1%



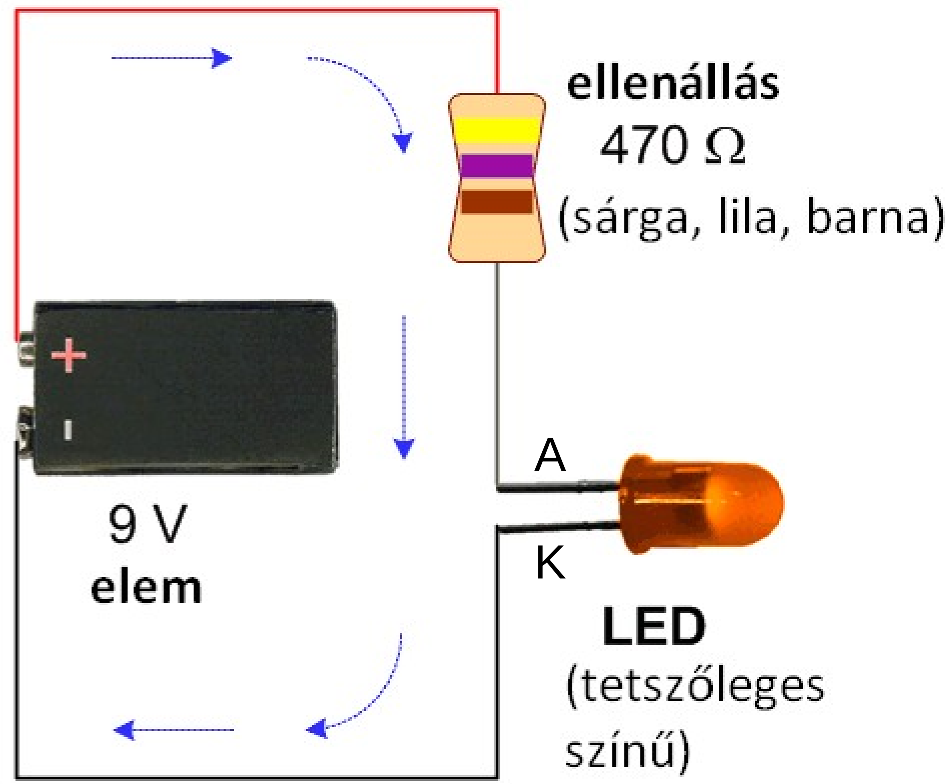
22 kΩ 1%

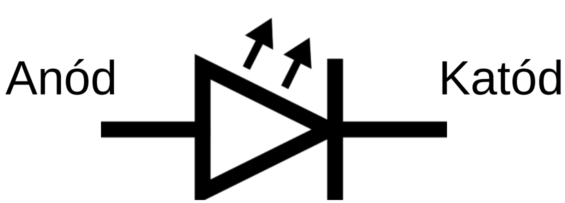


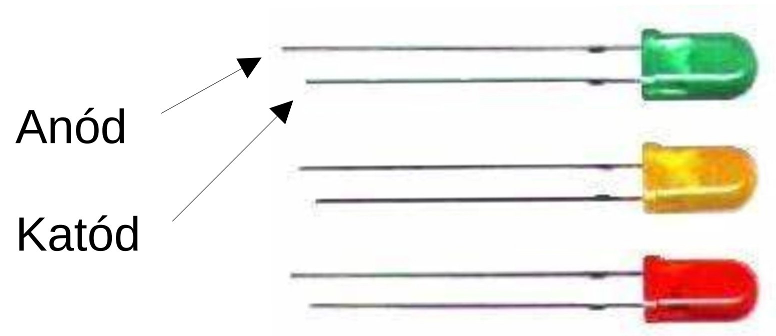


LED áramkorlátozó ellenállással

- A LED (Light Emitting Diode – fénykibocsájtó dióda) hosszabbik lába az anód
- A LED csak akkor világít, ha az egyezményes áramirány szerint az anódba folyik be az áram
- A LED áramát korlátoznunk kell (soros ellenállás, vagy áram-generátor segítségével)
- A közönséges LED-ek nyitó-feszültsége 2-3 V, maximális áramuk 20 – 30 mA

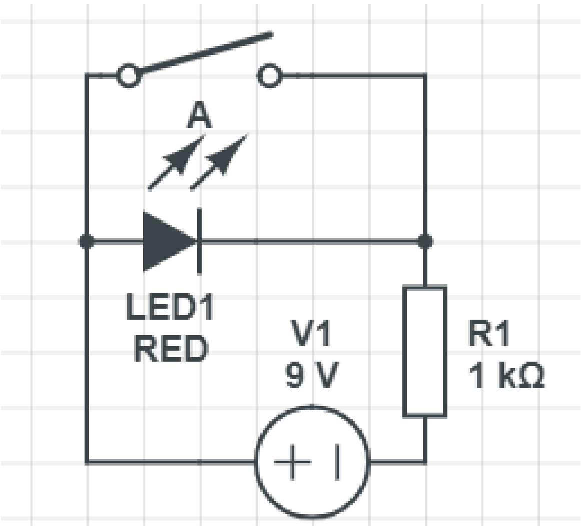






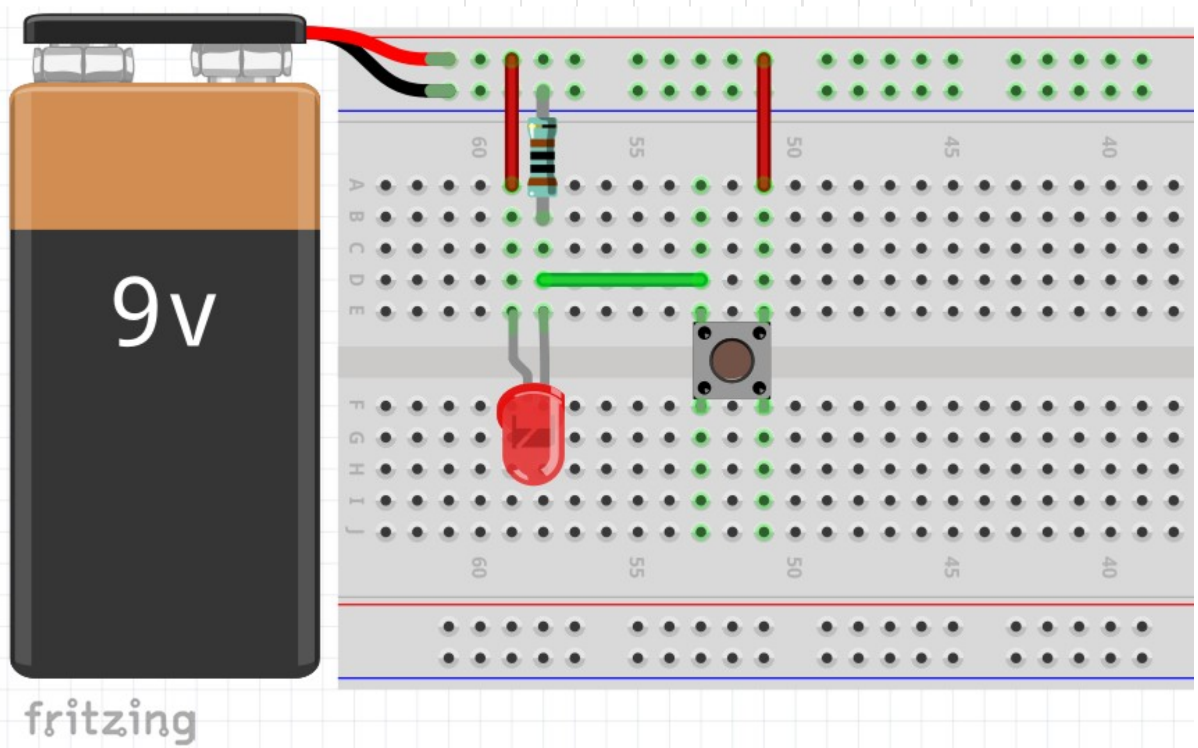
„NEM” áramkör

- Próbáljuk ki a „NEM” áramkört!
  Bemenet **1:** ha a kapcsoló zár, **0:** ha nyitva
  Kimenet **1:** ha a LED világít, **0:** ha nem
- Ellenőrizzük az igazságtáblázat teljesülését!
  (A LED csak akkor világít, ha a kapcsoló „KI" állásban van állítva)



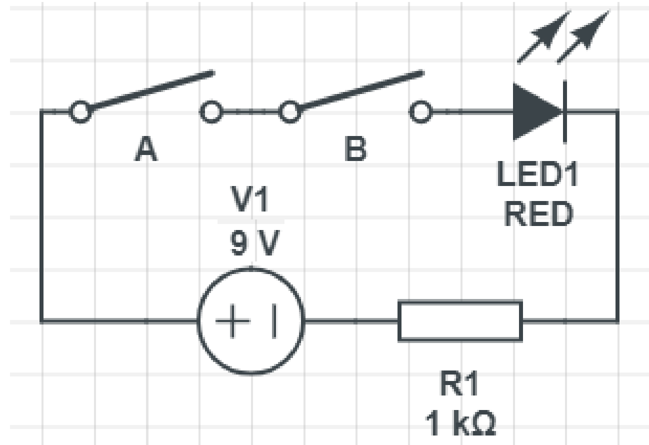
kapcsoló	LED
NYITVA	világít
ZÁR	sötét

A	L
0	1
1	0



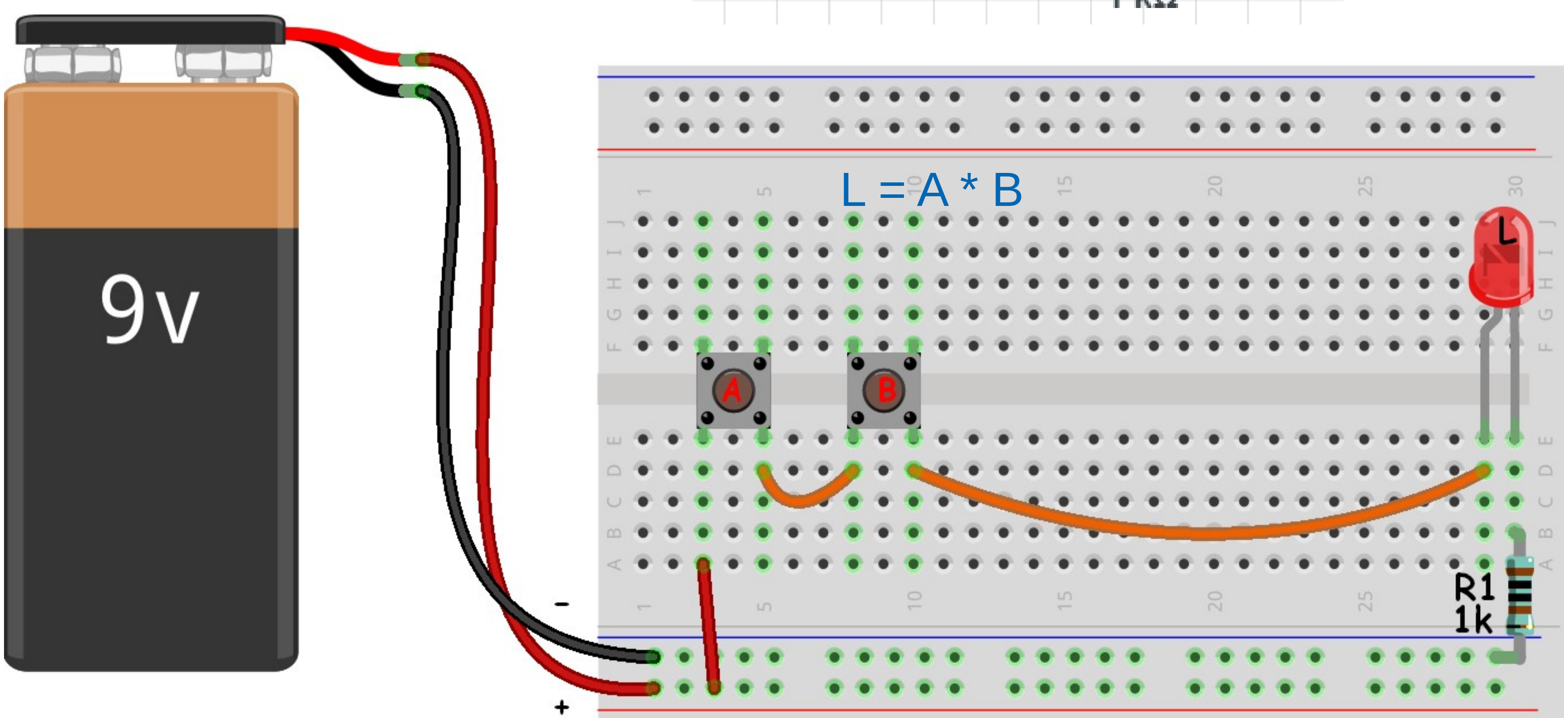
„ÉS” áramkör, kapcsolókkal

- A LED csak akkor világít, ha mindkét kapcsoló „BE” állásban van



ÉS (AND)
Logikai szorzás

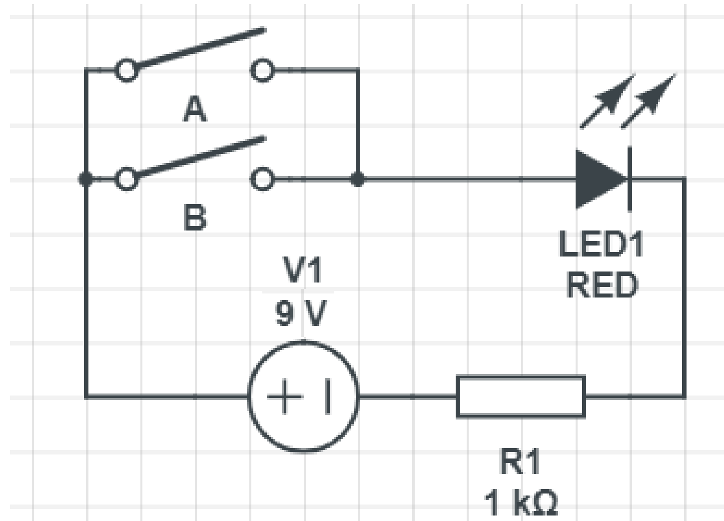
A	B	L
0	0	0
0	1	0
1	0	0
1	1	1



1: ha a kapcsoló zár
1: ha a LED világít

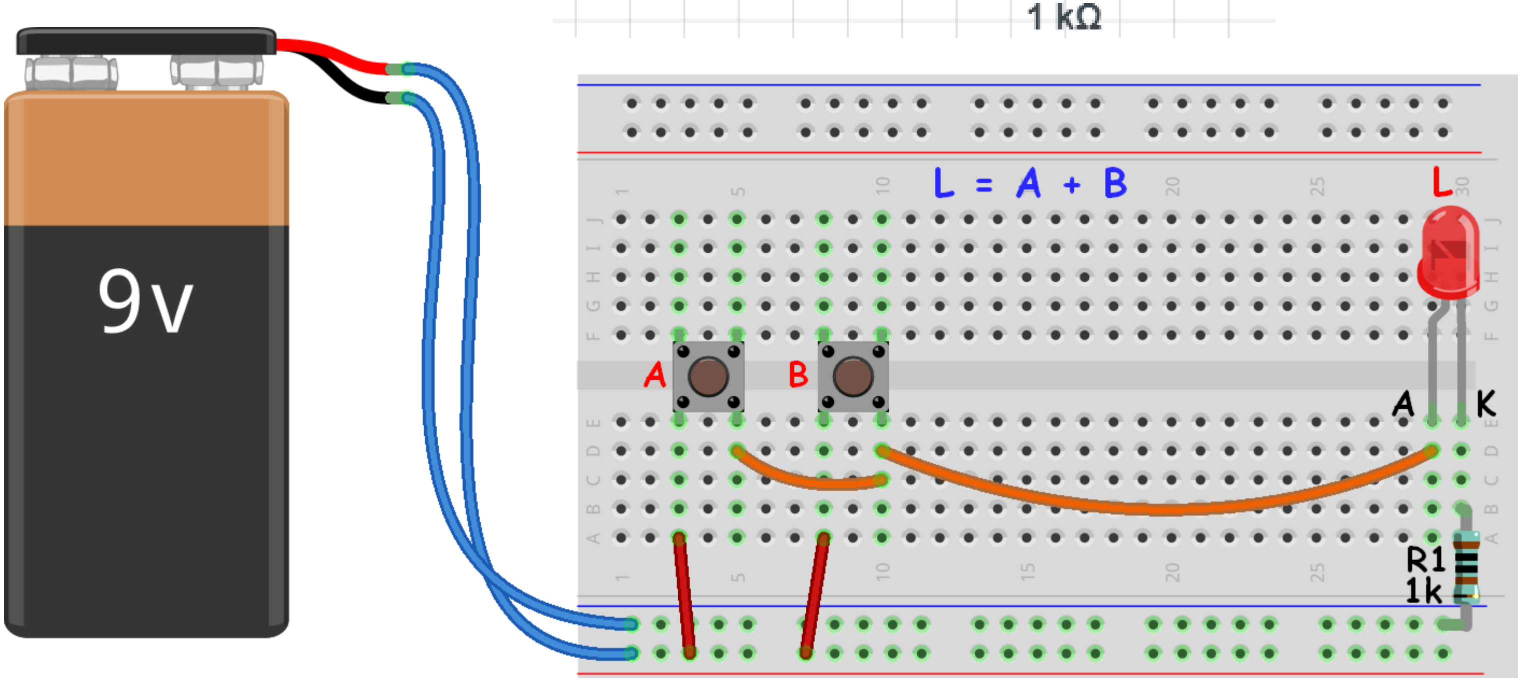
VAGY áramkör, kapcsolókkal

- A LED világít, ha bármelyik kapcsoló „BE” állásban van



VAGY (OR)
Logikai
összeadás

A	B	L
0	0	0
0	1	1
1	0	1
1	1	1

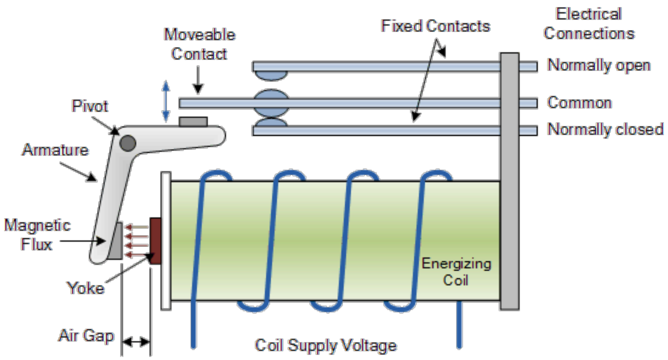


1: ha a kapcsoló zár
1: ha a LED világít

Logikai áramkör elektromágneses jelfogókkal

- Ha az előző példákban szereplő LED-ek helyére jelfogókat teszünk, azokkal további kontaktusokat vezérelhetünk, bonyolultabb logikai hálózatokat is kialakíthatunk.
- Konrad Zuse mérnök Z3 számítógépe (1941 Berlin) is így működött.
- **SPECIFIKÁCIÓ:**
  - Számítási sebesség: összeadás 0.8 s szorzás 3 s
  - Aritmetikai egység: 22 bit bináris lebegőpontos, összeadás/kivonás, szorzás/osztás, négyzetgyökvonás
  - Adatmemória: 64 db. 22 bites szó]
  - Programtároló: Celluloid lyukszalag. Bemenet: kapcsolósor kimenet: lámpasor
  - Alkatrészek: kb 2 000 jelfogó (1 400 a memóriához)
  - Frekvencia: 5.3 Hertz, Áramfogyasztás: kb. 4000 watt, Tömeg: kb. 1 000 kg

Link: en.wikipedia.org/wiki/Z3



A Kalmár-féle logikai gép

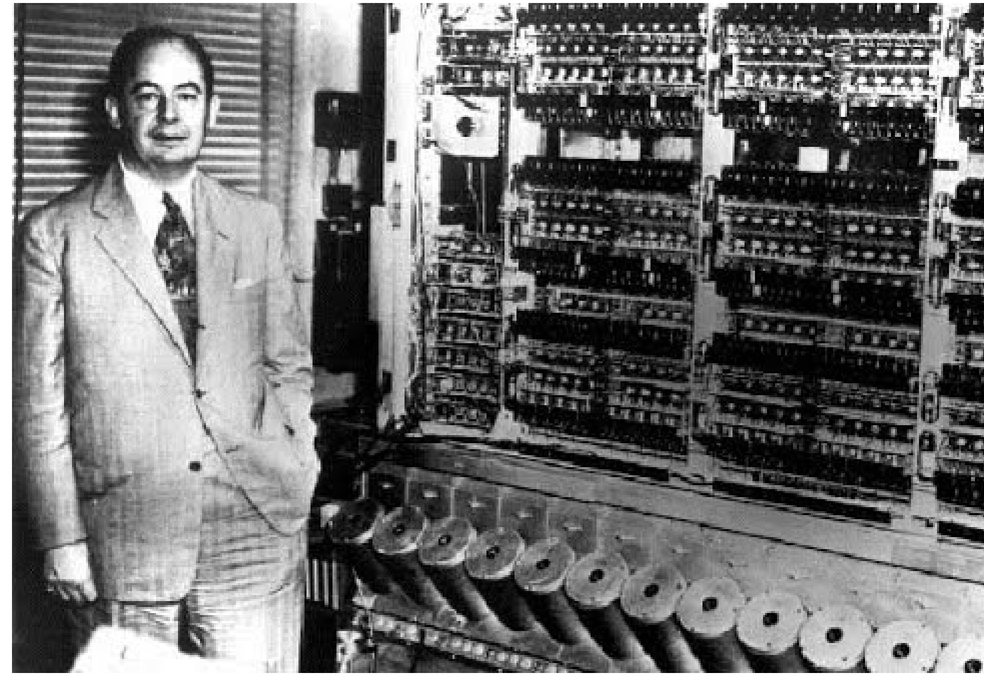
Kifejlesztő intézmény: Kalmár László (1905-1976), József Attila Tudományegyetem (JATE), Szeged
Kibocsátás éve: 1956-ban kezdte az építését és 1958 májusában készült el.
Kalmár László a gép tervezője
Muszka Dániel építette a gépet
A gép vezérlése elektromechanikus, memóriája 8 bites jelfogós, a dugaszolás útján felépített huzalos áramkör memória-célokat is szolgált, a vizsgálandó formulát a vizsgálat befejezéséig tárolta.
A gép kimenete jelzőlámpákkal volt megoldva, mutatták a gép állapotát, a logikai változók és a vizsgált formula logikai értékét, és jelezték, hogy a vizsgált formulák közül hánynak igaz a logikai értéke.

[***Wikipédia: Kalmár-féle logikai gép***]

Tipikus alkalmazások: Elsősorban **oktatásra** készült, de gyakorlati feladatokat is megoldottak segítségével, pl. **telefonközpont-kapcsolások, vasútbiztosító áramkörök** ellenőrzése

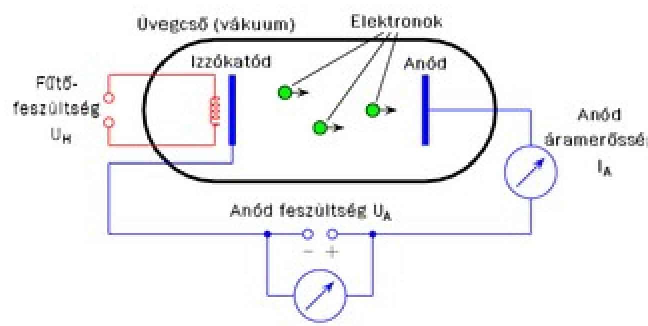
Elektroncsöves számítógépek: ENIAC

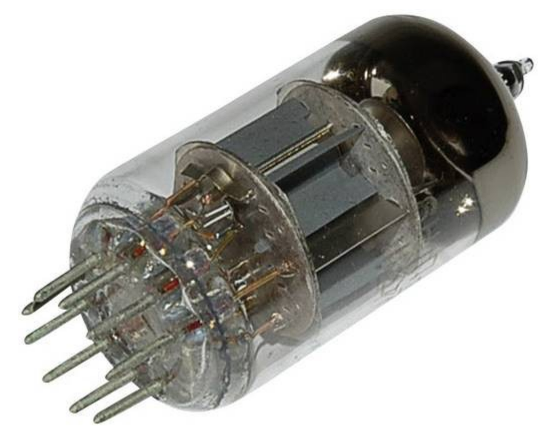
- ENIAC (1946) első elektronikus számítógép
  17 468 elektroncső,
  7200 félvezető dióda
  1500 jelfogó
- 2,5 m magas volt, 40 m hosszú és 30 tonna
- Energiaigény: 140 kW
- Órajel: 100 kHz
- Művetvégzés ideje:
  - Összeadás: 0,2 ms
  - Szorzás: 3 ms
  - Osztás: 30 ms



Link: [ENIAC - Wikipédia]

Elektroncső

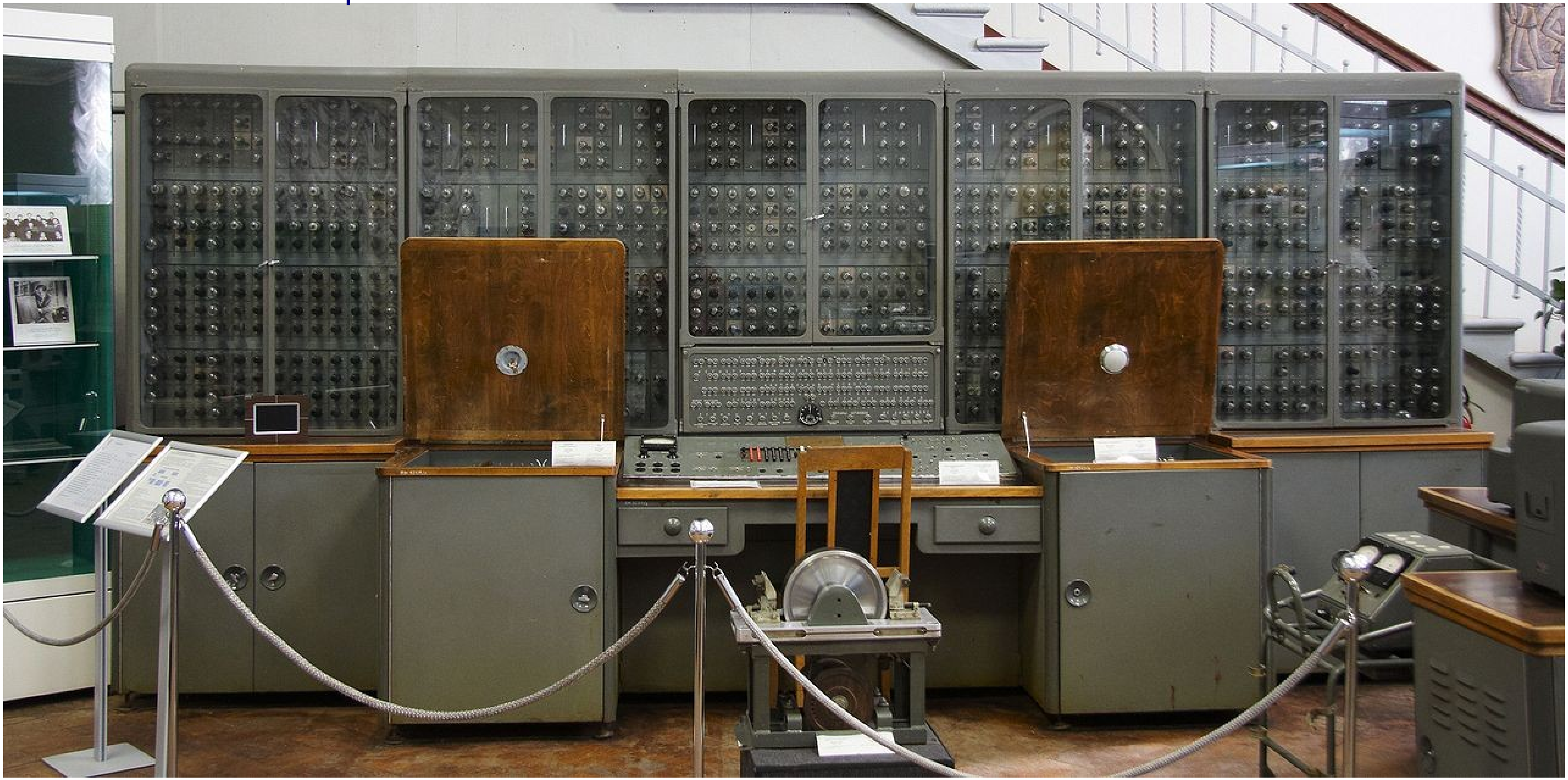




Elektroncsöves számítógépek: Ural-2

- Szovjet elektroncsöves számítógép, 1959 és 1964 között 139 db készült belőle. Ebből 3 db került Magyarországra.
  12 000 lebegőpontos műveletet/s, ferritgyűrűs memória, 30 kW

Link: Ural-2 - Wikipédia



Elektroncsöves számítógépek: M-3

- Az **M–3** első generációs számítógép. Az MTA Kibernetikai Kutatócsoportja által, szovjet tervdokumentáció alapján, az első Magyarországon épített elektronikus számítógép.
- Tungsram szubminiatűr elektroncsövekből épült. Egyedi magyar fejlesztés volt a memóriát helyettesítő 1024 szavas mágnesdob is, melyet később ferritgyűrűs tárra cseréltek
- Műveleti sebesség: mágnesdobbal 30/s, ferritgyűrűvel 1500/s
- 770 elektroncső, 2000 dióda, 10 KW, 3 m^2 alapterület

Link: M-3 - Wikipédia