

# Algebra 2R

a voyage into the unknown

koteczek

~

# Spis treści

<b>Teoria równań algebraicznych</b>	<b>4</b>
1.1 Rozwiązywanie układów równań . . . . .	4
1.2 Rozszerzanie ciał . . . . .	6
<b>Ciała skończone i pierwiastki z jedności</b>	<b>9</b>
2.1 Algebraiczne domknięcie ciała . . . . .	10
<b>Ciała proste, pierwiastki z jedności</b>	<b>12</b>
3.1 Ciała proste . . . . .	12
3.2 Pierwiastki z jedności . . . . .	12
3.3 Ciała skończone . . . . .	14
<b>Rozszerzenia ciał</b>	<b>15</b>
4.1 Wymiar przestrzeni liniowej . . . . .	15
<b>Wielomiany koła, domknięcia algebraiczne</b>	<b>20</b>
5.1 Wielomian rozkładu koła [cyclotomic polynomials] . . . . .	20
5.2 Domknięcia algebraiczne . . . . .	23
<b>Wstęp do teorii Galois</b>	<b>26</b>
6.1 Grupy Galois . . . . .	26
6.2 Rozszerzenia algebraiczne normalne . . . . .	26
6.3 Rozszerzenia rozdzielcze . . . . .	28
<b>Rozszerzenia radykalne (czysty Bangladesz)</b>	<b>31</b>
7.1 Stopień rozdzielczy, radykalny ciała . . . . .	33
<b>Przekształcenia liniowe</b>	<b>34</b>
8.1 Norma, ślad . . . . .	34
8.2 Rozszerzenia Galois . . . . .	34



# Wykład 1: Teoria równań algebraicznych

Przez  $R, S$  będziemy oznaczać pierścienie przemienne z  $1 \neq 0$ , natomiast  $K, L$  będziemy rezerwować dla oznaczeń ciał.

## 1.1 Rozwiązanie układów równań

Rozważmy funkcje  $f_1, \dots, f_m \in R[X_1, \dots, X_n]$ . Dla wygody będziemy oznaczać krotki przez  $\bar{X}$ , czyli  $R[X_1, \dots, X_n] = R[\bar{X}]$ . Pojawia się problem: czy istnieje rozszerzenie pierścienia z jednością  $R \subseteq S$  takie, że układ  $U : f_1(\bar{X}) = \dots = f_m(\bar{X}) = 0$  ma rozwiązanie w pierścieniu  $S$ ?

**Fakt 1.1.**  $\bar{a} = (a_1, \dots, a_n) \subseteq S$ , gdzie  $S$  jest rozszerzeniem pierścienia  $R$ , jest rozwiązaniem układu równań  $U \iff g(\bar{a}) = 0$  dla każdego wielomianu  $g \in (f_1, \dots, f_m) \triangleleft R[\bar{X}]$ .

**Dowód.**  $\Leftarrow$  Implikacja jest dość trywialna, jeśli każdy wielomian z  $(f_1, \dots, f_m)$ , czyli wytworzony za pomocą sumy i produktu wielomianów  $f_1, \dots, f_m$  zeruje się na  $\bar{a}$ , to musi zerować się też na każdym z tych wielomianów.

$\Rightarrow$  Rozważamy dwa przypadki:

1.  $(f_1, \dots, f_m) \ni b \neq 0$  i  $b \in R$ .

To znaczy w  $(f_1, \dots, f_m)$  mamy pewien niezerowy wyraz wolny. Wtedy mamy wielomian  $g \in (f_1, \dots, f_m)$  taki, że  $g(\bar{a}) \neq 0$ . Ale przecież  $g$  jest kombinacją wielomianów  $f_1, \dots, f_m$ , która na  $\bar{a}$  przyjmuje wartość 0. W takim razie dostajemy układ sprzeczny i przypadek jest do odrzucenia.

2.  $(f_1, \dots, f_m) \cap R = \{0\}$ . (nie ma wyrazów wolnych różnych od 0)

Teraz wiemy, że układ  $U$  jest niesprzeczny, a więc możemy skonstruować pierścień z 1  $S$  będący rozszerzeniem  $R$  [ $S \supseteq R$ ] oraz rozwiązanie  $\bar{a} \subseteq S$  spełniające nasz układ równań.

Niech  $S = R[\bar{X}]/(f_1, \dots, f_m)$  i rozważmy

$$j : R[\bar{X}] \rightarrow S = R[\bar{X}]/(f_1, \dots, f_m)$$

nazywane przekształceniem ilorazowym. Po pierwsze, zauważmy, że  $j \upharpoonright R$  jest 1 – 1, bo

$$\ker(j \upharpoonright R) = \ker(j) \cap R = (f_1, \dots, f_m) \cap R = \{0\}$$

i dlatego

$$j \upharpoonright R : R \xrightarrow{\cong} j[R] \subseteq S.$$

Z uwagi na ten izomorfizm, będziemy utożsamiać  $R, j[R]$ . W takim razie,  $S$  jest rozszerzeniem pierścienia  $R$ . Czyli mamy rozszerzenie pierścienia  $R$ .

Niech

$$\bar{a} = (a_1, \dots, a_n) = (j(X_1), \dots, j(X_n)) \subseteq S,$$

czyli jako potencjalne rozwiązanie rozważamy zbiór obrazów wielomianów stopnia 1 przez wcześniej zdefiniowaną funkcję  $j : R[\bar{X}] \rightarrow S$ . Tak zdefiniowane  $\bar{a}$  jest rozwiązaniem układu  $U$  w pierścieniu  $S$ , bo dla funkcji wielomianowej (czyli zapisywalnej jako wielomian)  $\hat{f}_i \in (f_1, \dots, f_m)$  mamy

$$\hat{f}_i(\bar{a}) = \hat{f}_i(j(X_1), \dots, j(X_n)) = j(\hat{f}_i(X_1, \dots, X_n)) = j(f_i) = 0.$$

**TUTAJ TRZEBA POUZASADNIAĆ KILKA RÓWNOŚCI, ALE MOŻE NIE BĘDĘ TEGO ROBIŁA NA AISD** ☕

**Uwaga 1.2.** Skonstruowane powyżej rozwiązanie  $\bar{a}$  układu  $U$  ma następującą własność uniwersalności:

(☞) Jeżeli  $S' \supseteq R$  jest rozszerzeniem pierścienia z 1 i  $\bar{a}' = (a'_1, \dots, a'_n) \subseteq S'$  jest rozwiązaniem  $U$  w  $S'$ , to istnieje jedyny homomorfizm

$$h : R[\bar{a}] \rightarrow R[\bar{a}']$$

taki, że  $h \upharpoonright R$  jest identycznością na  $R$  i  $h(\bar{a}) = \bar{a}'$ . Wszystkie rozwiązania układów są homomorficzne.

$$\begin{array}{ccc}
 R & \xrightarrow{\subseteq} & R[\bar{a}] \subseteq S \\
 \downarrow \subseteq & \nearrow h & \\
 R[\bar{a}'] \subseteq S' & & 
 \end{array}$$

Tutaj  $R[\bar{a}] \subseteq S$  jest **podpierścieniem generowanym przez  $R \cup \{\bar{a}\}$** , czyli zbiór:

$$R[\bar{a}] = \{f(\bar{a}) : f(\bar{X}) \in R[\bar{X}]\} \subseteq S$$

**Dowód.** Niech  $I = \{g \in R[\bar{X}] : g(\bar{a}') = 0\} \subseteq S'$ . Oczywiście mamy, że  $I \triangleleft R[\bar{X}]$ , a więc

$$(f_1, \dots, f_m) \subseteq I.$$

Z twierdzenia o faktoryzacji wie

$$\begin{array}{ccc}
 R[\bar{X}] & \xrightarrow{j} & S = R[\bar{X}]/(f_1, \dots, f_m) \\
 \downarrow \phi & \nearrow (\exists ! h) h(\bar{a}) = \bar{a}' & \\
 S' \supseteq R[\bar{a}'] & & 
 \end{array}$$

Homomorfizm  $\phi : R[\bar{X}] \rightarrow R[\bar{a}']$  określamy wzorem

$$\phi(w) = w(\bar{a}),$$

a homomorfizm  $j$  jest jak wyżej odwzorowaniem ilorazowym. Widzimy, że

$$I = \ker(\phi)$$

$$\ker(j) = (f_1, \dots, f_m).$$

Z twierdzenia o homomorfizmie pierścieni dostajemy jedyny homomorfizm

$$h : R[\bar{X}]/(f_1, \dots, f_m) \rightarrow R[\bar{a}]$$

taki, że  $h(\bar{a}) = \bar{a}'$ .



**Uwaga 1.3.** Jeśli  $I = (f_1, \dots, f_m)$ , to  $h : R[\bar{a}] \xrightarrow{\cong} R[\bar{a}']$ .

Wtedy mamy  $\ker \phi = \ker j$ , czyli  $\ker(h \circ j) = \ker \phi = \ker j$ , no a z tego wynika, że  $\ker h$  jest trywialne, czyli  $h$  jest apimorfizmem (1-1). Z drugiej strony,  $\text{Im } \phi = \text{Im}(h \circ j)$ , a  $\phi$  jest epimorfizmem ("na"), więc również  $h$  musi być "na".

Założmy, że  $S \supseteq R$  jest rozszerzeniem pierścienia oraz  $\bar{a} \in S^n$ . Wtedy:

1. ideał  $\bar{a}$  nad  $R$  definiujemy jako

$$I(\bar{a}/R) = \{g \in R[\bar{X}] : g(\bar{a}) = 0\}$$

2.  $\bar{a}$  nazywamy **rozwiązaniem ogólnym** układu  $U$ , jeśli ideał

$$I(\bar{a}/R) = (f_1, \dots, f_m).$$

**Uwaga 1.4.** W sytuacji jak z definicji wyżej, gdy  $U$  jest układem niesprzecznym, wtedy  $\bar{a}$  jest rozwiązaniem ogólnym układu  $U \iff$  zachodzi warunek (S) .

**Dowód.** Ćwiczenia.



## 1.2 Rozszerzanie ciał

Dla  $K \subseteq L$  ciał i  $\bar{a} \subseteq L$  definiujemy **ideał  $\bar{a}$  nad  $K$**  jako:

$$I(\bar{a}/L) := \{f(X_1, \dots, X_n) \in K[\bar{X}] : f(\bar{a}) = 0\},$$

to znaczy generujemy ideał w wielomianach nad  $K$  zawierający wszystkie wielomiany (niekoniecznie tylko jednej zmiennej) zerujące się w  $\bar{a}$ .

**Przykład:**

Dla  $K = \mathbb{Q}$ ,  $L = \mathbb{R}$ ,  $n = 1$ ,  $a_1 = \sqrt{2}$  mamy

$$I(\sqrt{2}/\mathbb{Q}) = \{f(x^2 - 2) : f \in \mathbb{Q}[X]\} = (x^2 - 2) \triangleleft \mathbb{Q}[X]$$

Dalej, definiujemy

$$K[\bar{a}] := \{f(\bar{a}) : f \in K[X]\}$$

czyli **podpierścień  $L$  generowany przez  $K \cup \{\bar{a}\}$**  oraz  $K(\bar{a})$ , czyli **podciało  $L$**  generowane przez  $K \cup \{\bar{a}\}$ :

$$K(\bar{a}) := \{f(\bar{a}) : f \in K(X_1, \dots, X_n) \text{ i } f(\bar{a}) \text{ dobrze określone}\}.$$

Tutaj  $K(X_1, \dots, X_n)$  to **ciało ułamków pierścienia**  $K[\bar{a}]$  w ciele  $L$  (czyli najmniejsze ciało, że pierścień może być w nim zanurzony). Czasami oznaczamy to przez  $K[\bar{a}]_0$ .

**Uwaga 1.5.** Niech  $K \subseteq L_1, K \subseteq L_2$  będą ciałami. Wybieramy  $\bar{a}_1 \in L_1$  i  $\bar{a}_2 \in L_2$ ,  $|\bar{a}_1| = |\bar{a}_2| = n$ . Wtedy następujące warunki są równoważne:

1. istnieje izomorfizm  $\phi : K[\bar{a}_1] \rightarrow K[\bar{a}_2]$  taki, że  $\phi \upharpoonright K = \text{id}_K$  oraz  $\phi(\bar{a}_1) = \bar{a}_2$ .
2.  $I(\bar{a}_1/K) = I(\bar{a}_2/K)$ .

**Dowód.**  $1 \implies 2$

Implikacja jest jasna, bo dla  $g(\bar{X}) \in K[\bar{X}]$ , bo  $g(\bar{a}_1) = 0$  w  $K[\bar{a}_1] \iff g(f(\bar{a}_1)) = 0$ , a  $f(\bar{a}_1) = \bar{a}_2$ .

$1 \longleftarrow 2$

Zwróć uwagę na odwzorowanie ewaluacji  $\bar{a}_1$

$$\phi_{\bar{a}_1} : K[\bar{X}] \xrightarrow{\text{"na"}} K[\bar{a}_1]$$

zadane wzorem

$$\phi(w(\bar{X})) = w(\bar{a}_1).$$

Mamy

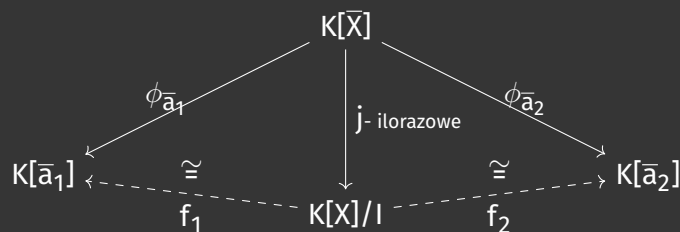
$$\ker(\phi_{\bar{a}_1}) = I(\bar{a}_1/K).$$

Tak samo dla  $\bar{a}_2$  możemy określić analogicznie odwzorowanie ewaluacyjne  $\phi_{\bar{a}_2} : K[\bar{X}] \rightarrow K[\bar{a}_2]$ . Wtedy

$$I(\bar{a}_2/K) = \ker(\phi_{\bar{a}_2}),$$

ale ponieważ  $I(\bar{a}_1/K) = I(\bar{a}_2/K)$ , to  $\ker(\phi_{\bar{a}_1}) = \ker(\phi_{\bar{a}_2})$ . Oznaczmy  $I = I(\bar{a}_1/K) = I(\bar{a}_2/K)$ . Widzimy, że  $\phi_{\bar{a}_i} \upharpoonright K = \text{id}_K$ .





Niech  $f = f_2 f_1^{-1} : K[\bar{a}_1] \rightarrow K[\bar{a}_2]$  jest funkcją spełniającą warunki punktu 1. ☕

**MOŻE TUTAJ ŁADNIE SPRAWDZIĆ ŻE NAPRAWDĘ JEST TO DOBRZE SPEŁNIAJĄCA WARUNKI FUNKCJA?**

**Uwaga.** Niech  $I \triangleleft K[\bar{X}]$  *noetherowskiego* pierścienia  $K[\bar{X}]$ . Niech  $I = (f_1, \dots, f_m)$  dla pewnych  $f_i \in K[\bar{X}]$ . Wtedy istnieje rozszerzenie pierścienia  $S \supseteq K$  oraz  $\bar{a} \subseteq S$  - rozwiązanie ogólne układu  $f_1(\bar{X}) = \dots = f_m(\bar{X}) = 0$  takie, że  $I(\bar{a}/K) = I$ .

**Dowód.** Uwaga 1.4. ☕

**Twierdzenie 1.6.** Niech  $I \triangleleft K[\bar{X}]$ . Wtedy istnieje ciało  $L \supseteq K$  oraz  $\bar{a} = (a_1, \dots, a_n) \subseteq L$  takie, że  $f(\bar{a}) = 0$  dla każdego  $f \in I$ .

**Dowód.** Niech  $I \subseteq M \triangleleft K[\bar{X}]$  będzie ideałem maksymalnym. Niech  $L = K[\bar{X}]/M$  i określmy przekształcenie ilorazowe

$$j : K[\bar{X}]/M \rightarrow L = K[\bar{X}]/M.$$

Ponieważ  $M \cap K = \{0\}$  (bo inaczej w ideale byłby wielomian odwracalny), to  $j \upharpoonright K : K \rightarrow L$  jest funkcją 1-1, czyli

$$j \upharpoonright K : K \xrightarrow{1-1} j[K] \subseteq L.$$

Możemy utożsamić  $K$  z  $j[K]$ , czyli  $K \subseteq L$ . Niech  $\bar{a} = (a_1, \dots, a_n)$  takie, że dla każdego  $i \in [n]$

$$a_i = j(X_i) \in L.$$

Wtedy  $g(\bar{a}) = 0$  dla każdego  $g(\bar{X}) \in M \supseteq I$  (bo inaczej mielibyśmy wyrazy wolne). ☕

**Wniosek 1.7.** Niech  $f \in K[X]$  stopnia  $> 0$ . Wtedy istnieje ciało  $L \supseteq K$  rozszerzające ciało  $K$  takie, że  $f$  ma pierwiastek w ciele  $L$ .

**Przykłady:**

1. Rozpatrzmy ciało  $K = \mathbb{Q}$  i  $f(X) = X - 2$ . Wtedy  $I = (f) \triangleleft \mathbb{Q}[X]$  jest ideałem maksymalnym, bo jest on pierwszy (w tym wypadku nierozkładalny). Równanie  $f = 0$  ma rozwiązanie ogólne w pierścieniu ilorazowym

$$\mathbb{Q}[X]/I \cong \mathbb{Q}.$$

Czyli nie zawsze musimy rozszerzać ciało do czegoś nowego.

2.  $\mathbb{C} = \mathbb{R}[i] = \mathbb{R}(i) = \mathbb{R}[z]$  dla każdego  $z \in \mathbb{C} \setminus \mathbb{R}$ , co jest na liście zadań.

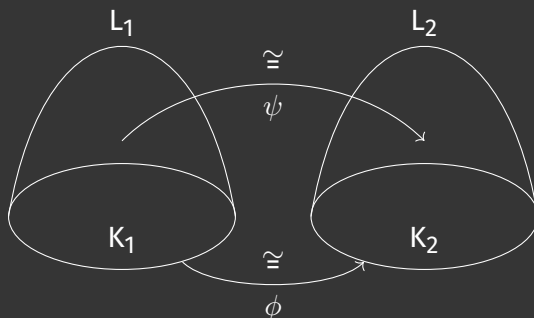
Założmy, że  $K \subseteq L_1, K \subseteq L_2$  są rozszerzeniami ciała. Wtedy mówimy, że  $L_1$  **jest izomorficzne z  $L_2$  nad  $K$**  [ $L_1 \cong_K L_2$ ]  $\iff$  istnieje izomorfizm  $f : L_1 \rightarrow L_2$  taki, że  $f \upharpoonright K = \text{id}_K$ .

**Fakt 1.8.**

1. Założmy, że  $f(X) \in K[X]$  jest nierozkładalny. Niech  $L_1 = K(a_1), L_2 = K(a_2)$  i  $f(a_i) = 0$  w  $L_i$ . Wtedy  $L_1 \cong_K L_2$ .
2. Ogólniej: założmy, że  $\phi : K_1 \rightarrow K_2$  jest izomorfizmem i  $f_1 \in K_1[X], f_2 \in K_2[X], \phi(f_1) = f_2, f_i$  jest nierozkładalny. Dodatkowo założmy, że  $L_1 = K_1(a_1)$  i  $L_2 = K_2(a_2)$ , gdzie  $f_i(a_i) = 0$  w  $L_i$ . Wtedy istnieje izomorfizm  $\psi \in \psi : L_1 \rightarrow L_2$  taki, że  $\psi(a_1) = a_2$ .

## Dowód.

1.  $I(a_1/K) = (f) = I(a_2/K)$ , stąd na mocy 1.5 mamy  $K(a_1) \cong_K K(a_2)$ . Po dowodzie przypadku 2. możemy uzasadnić, że jest to szczególny przypadek tego ogólniejszego stwierdzenia właśnie.
2. Zaczniemy od rozrysowania tej sytuacji:



Izomorfizm  $\phi : K_1[X] \xrightarrow{\cong} K_2[X]$  indukuje nam przekształcenie

$$K_1[X]/(f_1) \xrightarrow[\phi]{\cong} K_2[X]/(f_2),$$

bo  $\phi(f_1) = f_2$ . Wiemy, że  $f_i$  jest nierozkładalne, czyli

$$I(a_i/K_i) = (f_i) \triangleleft K_i[X]$$

jest ideałem maksymalnym. Mamy

$$L_i = K_i(a_i) = K_i[a_i] \cong K[X]/I(a_i/K_i).$$

$$\begin{array}{ccc}
 K_1[X] & \xrightarrow[\phi]{\cong} & K_2[X] \\
 \downarrow & & \downarrow \\
 K_1[X]/(f_1) & \xrightarrow[\phi]{\cong} & K_2[X]/(f_2) \\
 \cong \downarrow h_1 & & \cong \downarrow h_2 \\
 L_1 = K_1(a_1) & \xrightarrow[\psi]{\cong} & L_2 = K_2(a_2) \\
 \cup & & \cup \\
 K_1 & \xrightarrow[\phi]{} & K_2
 \end{array}$$





## Wykład 2: Ciała skończone i pierwiastki z jednościami

Ciało  $L \supseteq K$  nazywamy **ciałem rozkładu nad  $K$**  wielomianu  $f \in K[X]$ , gdy spełnione są warunki:

1.  $f$  rozkłada się w pierścieniu  $L[X]$  na czynniki liniowe (stopnia 1)
2. Ciało  $L$  jest rozszerzeniem ciała  $K$  o elementy  $a_1, \dots, a_n$ , gdzie  $a_1, \dots, a_n$  to wszystkie pierwiastki  $f$  w  $L$ .

**Przykład:** Jeżeli  $\deg(f) = 0$ , to nie istnieje ciało rozkładu  $f$ .

**Wniosek 2.1.** Załóżmy, że  $f \in K[X]$  jest wielomianem stopnia  $> 0$ . Wtedy

1. istnieje  $L$ : ciało rozkładu  $f$  nad  $K$ ,
2. to ciało jest jedyne z dokładnością do izomorfizmu nad  $K$ .

**Dowód.**

1. Dowód przez indukcję względem stopnia  $f$

Jako przypadek bazowy rozważmy  $f$  takie, że  $\deg(f) = 1$ . Wtedy  $L = K$  i wszystko wniosek jest spełniony.

Założmy teraz, że stopień wielomianu  $f$  jest  $> 1$  i też zachodzi dla wszystkich wielomianów stopnia  $< \deg(f)$  i wszystkich ciał  $K'$ . Teraz z 1.7 wiemy, że istnieje rozszerzenie ciała  $L \supseteq K$  takie, że  $f$  ma pierwiastek w  $L$ . Nazwijmy ten pierwiastek  $a_0$  i niech

$$K' = K(a_0).$$

Ponieważ  $K'[X]$  wielomian  $f$  ma pierwiastek  $a_0$ , to możemy zapisać

$$f = (x - a_0)f_1$$

dla pewnego  $f_1 \in K'[X]$  i  $\deg(f_1) < \deg(f)$ . Z założenia indukcyjnego dla  $f_1$  istnieje  $L' = K'(a_1, \dots, a_r)$  - ciało rozkładu wielomianu  $f_1$  nad  $K'$ . Wtedy

$$L = K(a_0, \dots, a_r)$$

jest ciałem rozkładu  $f$  nad  $K$ .

2. Udowodnimy wersję ogólniejszą:

(👉) Jeśli  $\phi : K_1 \xrightarrow{\cong} K_2$  jest izomorfizmem nad ciałem i  $f_i \in K_i[X]$  jest wielomianem stopnia  $> 0$ ,  $\phi(f_1) = f_2$ , to wtedy istnieje  $\psi : L_1 \xrightarrow{\cong} L_2$  izomorfizm nad ciałami rozkładu  $f_i$  w  $K_i$  rozszerzający izomorfizm  $\phi$  (to znaczy  $\phi \subseteq \psi$ ).

Wykorzystamy indukcję po  $\deg(f)$ . W przypadku bazowym mamy  $\deg(f) = 1$ , czyli  $L_1 = K_1, L_2 = K_2$  i  $\phi = \psi$ .

Teraz niech  $\deg(f) > 1$  i założmy, że dla wszystkich ciał  $K'$  oraz wielomianów stopnia  $< \deg(f)$  jest to prawdą. Niech

$$f_i = f'_i \cdot g_i,$$

gdzie  $f'_i, g_i \in K_i[X]$  i  $g_i$  jest wielomianem nierozkładalnym w  $K$ . Wiemy już, że istnieje  $a_i \in L_i$  będące pierwiastkiem wielomianu  $g_i$ .

Z faktu 1.8.(2), wiemy, że istnieje wtedy izomorfizm

$$\psi_0 : K_1(a_1) \xrightarrow{\cong} K_2(a_2)$$

taki, że  $\psi_0(a_1) = a_2$  i  $\phi \subseteq \psi_0$ .

$$\begin{array}{ccc}
 K_1(a_1) & \xrightarrow[\exists \psi_0]{\cong} & K_2(a_2) \\
 \parallel & & \parallel \\
 K'_1 & & K'_2 \\
 \cap \downarrow & & \cap \downarrow \\
 L_1 & \xrightarrow[\exists \psi_1]{\cong} & L_2
 \end{array}$$

Z założenia wiemy, że  $L_1$  to ciało rozkładu  $f'_1$  nad  $K_1$ . W takim razie z założenia indukcyjnego istnieje izomorfizm

$$\psi_1 : L_1 \xrightarrow{\cong} L_2$$

taki, że  $\psi \subseteq \psi_0$  i to już jest koniec. ☕

**Wniosek 2.2.** Jeśli  $f_1 \in K_1[X]$  i  $f_2 \in K_2[X]$  są nierozkładalnymi wielomianami,  $\phi : K_1 \xrightarrow{\cong} K_2$  izomorfizmem i  $\phi(f_1) = f_2$ , a  $L_1, L_2$  to ciała rozkładu  $f_1, f_2$  odpowiednio nad  $K_1$  i  $K_2$ ,  $a_i \in L_i$  to pierwiastek  $f_i$ , to wtedy istnieje  $\psi : L_1 \xrightarrow{\cong} L_2$  takie, że  $\psi(a_1) = a_2$ .

**Dowód.** Wynika z dowodu stwierdzenia (☛). ☕

## 2.1 Algebraiczne domknięcie ciała

Ciało  $L$  jest **algebraicznie domknięte**  $\iff$  dla każdego  $f \in L[X]$  o stopniu  $> 0$  istnieje pierwiastek  $f$  w  $L$ . To znaczy każdy wielomian rozkłada się na czynniki liniowe nad  $L$ .

**Przykład:**

- $\mathbb{C}$  jest algebraicznie domknięte.
- $\mathbb{R}$  nie jest algebraicznie domknięte, gdyż  $x^2 + 1$  nie ma pierwiastka rzeczywistego.
- $\mathbb{Q}[i]$  nie jest algebraicznie domknięte, bo  $x^2 - 2$  nie ma pierwiastka.

**Twierdzenie 2.3.** Każde ciało  $K$  zawiera się w pewnym ciele algebraicznie domkniętym.

**Dowód.** Jak mamy wielomian nad ciałem, to istnieje rozszerzenie ciała do tego wielomianu. I dalej leci kombinatoryka.

**Lemat:** Dla każdego ciała  $K$  istnieje  $L \supseteq K$  takie, że  $(\forall f \in K[X])$  stopnia  $> 0$ ,  $f$  ma pierwiastek w  $L$ .

Rozważmy dobry porządek na zbiorze wielomianów z  $K[X]$  stopnia  $> 0$

$$\{f \in K[X] : \deg(f) > 0\} = \{f_\alpha : \alpha < \kappa\}.$$

Tutaj  $\alpha, \kappa$  to liczby porządkowe, niekoniecznie skończone. Skonstruujemy rosnący ciąg rozszerzeń ciał  $\{K_\alpha : \alpha < \kappa\}$  taki, że

- $K \subseteq K_\alpha \subseteq K_\beta$  dla  $\alpha < \beta < \kappa$
- $f_\alpha$  ma pierwiastek w  $K_{\alpha+1}$ .

Dowód przez indukcję pozaskończoną. Dla  $K_0 = K$ .

Założmy, że  $\alpha < \kappa$  i mamy  $\{K_\beta : \beta < \alpha\}$  spełniając warunki powyżej. Niech  $K' = \bigcup_{\beta < \alpha} K_\beta$ . Musimy pokazać, że  $K'$  jest ciałem.

1.  $\alpha$  to liczba graniczna. Definiujemy  $K' = \bigcup_{\beta < \alpha} K_\beta$  jako zbiór.

Musimy określić działania w  $K'$ . Niech  $x, y \in K'$ , wtedy istnieje  $\beta < \alpha$  takie, że  $x, y \in K_\beta$ . Czyli  $x + y \in K_\beta \subseteq K'$  i  $xy \in K_\beta \subseteq K'$ . W takim razie  $K'$  jest rozszerzeniem ciała  $K_\beta$ .

Teraz definiujemy  $K_\alpha = K'$  i otrzymujemy pożądane rozszerzenie ciała.

2.  $\alpha = \beta + 1$  to następnik, wtedy  $K' = K_\beta$ .

Wielomian  $f_\alpha$  jest wielomianem nad  $K \subseteq K'$ . Z wniosku 1.7 wiemy, że istnieje rozszerzenie  $K_\alpha \supseteq K$  takie, że  $f_\alpha$  ma pierwiastek w  $K_\alpha$ .

$L$  definiujemy jako sumę po wyżej udowodnionej konstrukcji:

$$L = \bigcup_{\alpha < \kappa} K_\alpha$$

i to ciało spełnia nasz lemat.

Wracamy teraz do dowodu twierdzenia 2.3 i niech  $(L_n, n < \omega)$  będzie rosnącym ciągiem ciał takim, że

- $L_0 = K$
- $L_{n+1} \supseteq L_n$ , gdzie  $L_{n+1}$  dane jest przez lemat, to znaczy  $(\forall f \in L_n[X])$   $f$  ma pierwiastek w  $L_{n+1}$ .

Niech

$$L_\infty = \bigcup_{n < \omega} L_n \supseteq K.$$

Jest to ciało, ponieważ suma rosnącego ciągu ciał jest ciałem. Dalej mamy, że jest to ciało algebraicznie domknięte, gdy dowolny  $f \in L_\infty[X]$  ma stopień skończony  $> 0$ , czyli istnieje  $n$  takie, że  $f \in L_n[X]$ . A więc  $f$  ma wszystkie pierwiastki w  $L_{n+1} \subseteq L_\infty$ . ☕

## Wykład 3: Ciała proste, pierwiastki z jedności

### 3.1 Ciała proste

**Uwaga 3.0.** Załóżmy, że mamy ciała  $K \subseteq L$ . Wtedy

- $\text{char}(K) = \text{char}(L)$
- $0_K = 0_L$  oraz  $1_K = 1_L$
- $K^* = K \setminus \{0\} \subseteq L^* = L \setminus \{0\}$  oraz dla  $x \in K$   $-x$  w  $K$  jest równe  $-x$  w  $L$ .

$K$  jest **ciałem prostym** wtedy i tylko wtedy, gdy  $K$  nie zawiera żadnego właściwego podciała.

**Przykład:**

- $\mathbb{Q}$ , gdzie  $\text{char}(\mathbb{Q}) = 0$  to ciało proste nieskończone.
- Ciałem prostym skończonym jest na przykład  $\mathbb{Z}_p$  dla liczby pierwszej  $p$ , wtedy  $\text{char}(\mathbb{Z}_p) = p$ .

**Uwaga 3.1.**

1. Każde ciało zawiera jedyne podciało proste
2. Z dokładnością do  $\cong \mathbb{Q}, \mathbb{Z}_p$  to wszystkie ciała proste.

**Przykład:** Załóżmy, że  $K$  jest skończone. Wtedy  $K^*$  też jest skończone rzędu  $|K^*| = n < \infty$ . Później dowiemy się, że  $|K| = p^k$ , a więc  $|K^*| = p^k - 1$ . Wiemy, że dla każdego  $x \in K^*$  zachodzi  $x^n = 1$ .

### 3.2 Pierwiastki z jedności

Niech  $R$  będzie pierścieniem przemiennym z  $1 \neq 0$ . Mamy następujące definicje:

1.  $a \in R$  jest **pierwiastkiem z 1** stopnia  $n > 0 \iff a^n = 1$
2.  $\mu_n(R) = \{a \in R : a^n = 1\}$  jest **grupą pierwiastków z 1** stopnia  $n$
3.  $\mu(R) = \{a \in R : (\exists n) a^n = 1\} = \bigcup_{n>0} \mu_n(R)$  jest **grupą pierwiastków z 1**
4.  $a$  jest **pierwiastkiem pierwotnym** [primitive root] stopnia  $n$  z 1  $\iff a \in \mu_n(R)$  oraz dla każdego  $k < n$   $a \notin \mu_k(R)$ .

**Uwaga 3.2.**

1.  $\mu_n(R) \triangleleft R^*$  jest grupą jednostek pierścienia
2.  $\mu(R) \triangleleft R^*$
3.  $\mu(R)$  jest **torsyjną grupą abelową** (każdy element jest pierwiastkiem z 1).

**Przykłady**

1.  $\mu(\mathbb{C}) = \bigcup_{n>0} \mu_n(\mathbb{C}) \leq (\{z \in \mathbb{C} : |z| = 1\}, \cdot) \triangleleft \mathbb{C}^* = \mathbb{C} \setminus \{0\}$  jest nieskończona.
2.  $\mu(\mathbb{C}) \cong (\mathbb{Q}, +) / (\mathbb{Z}, +)$ , bo  $f : \mathbb{Q} \xrightarrow[\text{homo}]{\text{"na"}} \mu(\mathbb{C})$  taki, że  $f(w) = \cos(w2\pi) + i \sin(w2\pi)$  ma jądro  $\ker(f) = \mathbb{Z}$ .
3.  $\mu(\mathbb{R}) = \{\pm 1\}$
4.  $\mu_n(K) = \{\text{zera wielomianu } x^n - 1\}$ . Ten wielomian będziemy oznaczali  $w_n(x) = x^n - 1$ .

**Uwaga 3.3.**

1. Jeśli  $\text{char}(K) = 0$ , to  $w_n(x) = x^n - 1$  ma tylko pierwiastki jednokrotne w  $K$  [simple roots]
2. Jeśli  $\text{char}(K) = p > 0$  i  $n = p^l n_1$  takie, że  $p \nmid n_1$ , to wszystkie pierwiastki  $w_n(x) = x^n - 1$  mają krotność  $p^l$  w  $K$ .

### Dowód:

1. Niech  $a \in K$  takie, że  $w_n(a) = 0$ . Z twierdzenia Bezouta mamy, że

$$w_n(x) = x^n - 1 = x^n - a^n = (x - a)(x^{n-1} + ax^{n-2} + \dots + a^{n-2}x + a^{n-1}) = (x - a)v_n(x),$$

gdzie  $v_n(x) = x^{n-1} + ax^{n-2} + \dots + a^{n-2}x + a^{n-1}$ .

Z tego, że  $\text{char}(K) = 0$  wynika, że  $v_n(a) = na^{n-1} \neq 0$ , skąd wynika, że  $a$  jest jednokrotnym pierwiastkiem  $w_n(x)$ .

2. Jesteśmy w ciele  $K$  o  $\text{char}(K) = p$ . Niech  $n = p^l n_1$ . Rozważmy wielomian

$$w_n(x) = x^n - 1 = (x^{n_1})^{p^l} - 1^{p^l} = (x^{n_1} - 1)^{p^l} = w_{n_1}(x)^{p^l}.$$

Czyli  $\mu_n(K) = \mu_{n_1}(K)$ . Załóżmy, że  $a \in K$  to pierwiastek wielomianu  $w_n(x)$ . Wtedy  $a$  jest też pierwiastkiem wielomianu  $w_{n_1}$  w ciele  $K$ . Wtedy

$$w_{n_1}(x) = (x - a)v_{n_1}(x),$$

$v_{n_1}$  jak w przypadku wyżej. Wówczas

$$v_{n_1}(a) = n_1 a^{n_1-1} \neq 0,$$

bo  $p \nmid n_1$ . Jeśli  $a$  jest 1-krotnym pierwiastkiem  $w_{n_1}(x)$ , to jest on  $p^l$ -krotnym pierwiastkiem  $w_n(x)$ .

**Twierdzenie 3.4.** Niech  $G < \mu(K)$  i  $G$  jest podgrupą skończoną o  $|G| = n$ . Wtedy

1.  $G = \mu_n(K)$
2.  $G$  jest cykliczna
3. Jeśli  $\text{char}(K) = p > 0$ , to  $p \nmid n$ .

### Dowód.

1. Jeśli  $|G| = n$ , to dla każdego  $x \in G$  mamy  $x^n = 1$ . Z tego wynika, że  $G \subseteq \mu_n(K)$ , ale  $|\mu_n(K)| \leq n$ , czyli  $G = \mu_n(K)$ .
2. Chcemy pokazać, że dla wielomianu  $w_n(x)$  mamy  $n$  różnych pierwiastków. Wystarczy pokazać, że istnieje  $x \in G$  taki, że  $\text{ord}(x) = n$ .

Założmy nie wprost, że dla każdego  $x \in G$   $\text{ord}(x) < n$ . Niech

$$k = \max\{\text{ord}(x) : x \in G\}.$$

Niech  $x_0 \in G$  takie, że  $\text{ord}(x_0) = k$ . Wtedy

$$(\forall y \in G) \text{ord}(y) \mid k.$$

Gdyby tak nie było, to istniałby  $y \in G$ ,  $\text{ord}(y) \nmid k$ . Czyli istnieje liczba pierwsza  $p$  taka, że  $l$  jest podzielne przez wyższą potęgę  $p$  niż  $k$ . To oznacza, że  $l = p^\alpha l'$  i  $k = p^\beta k'$ , gdzie  $p \nmid l'$  i  $\alpha > \beta$ .

Rozważmy  $y' = y^{l'}$ . Skoro  $y$  ma rząd  $l$ , to  $\text{ord}(y') = p^\alpha$ , a dla  $x'_0 = x_0^{p^\beta}$  mamy  $\text{ord}(x'_0) = k'$ . Wobec tego  $\text{ord}(x'_0 y') = p^\alpha \cdot k'$ , ale to jest większe od  $k$  i dostajemy sprzeczność.

3. Wiemy, że wszystkie pierwiastki  $w_n = x^n - 1$  są jednokrotne, bo jest ich w tym przypadku dokładnie  $n$  (z poprzedniego punktu). Z uwagi 3.3, że jeśli  $n = p^l n_1$ , to pierwiastki wielomianu  $w_n(x)$  mają krotność  $p^l$ . Ale w tym przypadku pierwiastki mają krotność jeden, czyli  $p^l = 1$  i  $n = 1 \cdot n_1$ , gdzie  $p \nmid n_1$ .



**Wniosek 3.5.** Jeśli  $a \in \mu_n(K)$  jest pierwiastkiem pierwotnym z 1 stopnia  $n > 1$ , to  $a$  generuje  $\mu_n(K)$ .

**Dowód.**  $\mu_n(K) \supseteq \langle a \rangle = \mu_k(K)$  dla pewnego  $k \in \mathbb{N}$ . Ale ponieważ  $a$  było pierwiastkiem pierwotnym z 1, to musimy mieć  $n = k$ .



### 3.3 Ciąta skończone

**Twierdzenie 3.6.** Niech  $K$  będzie ciałem skończonym. Wtedy

1.  $\text{char}(K) = p \implies |K| = p^n$  dla pewnego  $n \in \mathbb{N}$
2. Dla każdego  $n > 0$  istnieje dokładnie jedno ciało  $K$  takie, że  $|K| = p^n$  z dokładnością do izomorfizmu. Ciało mocy  $p^n$  będziemy oznaczać  $F(p^n)$ .

**Dowód.** 1. Skoro  $\text{char}(K) = p$ , to  $\mathbb{Z}_p \subseteq K$  jest najmniejszym podciałem prostym ciała  $K$ . W takim razie,  $K$  jest skończoną przestrzenią liniową nad  $\mathbb{Z}_p$ . Jeśli  $n = \dim_{\mathbb{Z}_p}(K)$ , to  $K$  jest izomorficzne z  $\mathbb{Z}_p^n$ , jako przestrzeń liniowa nad  $\mathbb{Z}_p$ . W takim razie  $|K| = p^n$ .

2.

*Istnienie:*

Niech  $n > 0$ . Rozważmy

$$w_{p^n-1}(x) = x^{p^n-1} \in \mathbb{Z}_p[X].$$

Niech  $L \supseteq \mathbb{Z}_p$  będzie ciałem rozkładu wielomianu  $w_{p^n-1}$ , a  $K = \{0\} \cup \{\text{pierwiastki } w_{p^n-1}\}$ . Wtedy

$$|K| = 1 + p^n - 1 = p^n,$$

czyli mamy potencjalne ciało rzędu  $p^n$ . Wystarczy więc pokazać, że  $K$  jest ciałem.

Niech  $f : L \xrightarrow{1-1} L$  będzie funkcją Frobeniusa  $x \mapsto x^p$ . Teraz niech  $f^n = f \circ \dots \circ f$ ,  $f^n(x) = x^{p^n}$ . Jest to monomorfizm, bo składamy ze sobą  $n$  takich samych funkcji  $1-1$ . Dla  $a \in L$  mamy

$$(a^{p^n-1} = 1 \vee a = 0) \iff a \in K.$$

Co więcej,  $a^{p^n-1} = 1 \iff a^{p^n} = a \iff f^n(a) = a$ , czyli  $K = \{a \in L : f^n(a) = a\}$  jest zbiorem punktów stałych morfizmu  $f^n$ , czyli jest ciałem, czego dowód jest pozostawiony na ćwiczenia.

*Jedyność  $K$ :*

Ciało  $K$  stworzone jak wyżej jest ciałem rozkładu  $w_{p^n-1}(x)$  nad  $\mathbb{Z}_p$ .

Żałujemy nie wprost, że  $K'$  to inne ciało mocy  $p^n$ . Bez straty ogólności  $\mathbb{Z}_p \subseteq K'$ . Niech  $x \in K'$ . wiemy, że  $x = 0$  lub  $x^{p^n-1} = 1$ . W takim razie  $w_{p^n-1}$  rozkłada się nad  $K'$  na czynniki liniowe. Zatem  $K'$  jest również ciałem rozkładu  $w_{p^n-1}$  nad  $\mathbb{Z}_p$ .

Z wniosku 2.1.(2) mamy, że dwa ciała rozkładu nad jednym wielomianem są izomorficzne i  $K \cong K'$  nad  $\mathbb{Z}_p$  i mamy sprzeczność. ☕

## Wykład 4: Rozszerzenia ciał

**Definicja 4.1.** Niech  $K \subseteq L$  będą ciałami i  $a \in L \setminus K$ .

- Jeżeli  $a$  jest algebraiczny nad  $K$ , to istnieje  $f \in K[X]$  stopnia  $> 0$  i  $f(a) = 0$
- $a$  jest przestępny nad  $K$  [transcendental]  $\iff a$  nie jest algebraiczny.
- **Rozszerzenie**  $L \supseteq K$  jest **algebraiczne**  $\iff$  dla każdego  $a \in L$   $a$  jest algebraiczny nad  $K$ .
- **Rozszerzenie jest przestępne**  $\iff$  nie jest algebraiczne.
- Niech  $a \in \mathbb{C}$ . Wtedy  $a$  jest algebraiczna, gdy  $a$  jest algebraiczna nad  $\mathbb{Q}$ .

**Przykłady:**

1. W  $\mathbb{C}$  na  $i$  jest pierwiastkiem algebraicznym wielomianu  $x^2 + 1$ , a  $\sqrt[n]{d}$  jest pierwiastkiem  $x^n - d$ .
2. Ciało  $F(p^n)$  ma charakterystykę  $p$  i  $F(p) \subseteq F(p^n)$  jest rozszerzeniem ciał, które jest algebraiczne. Dla dowolnego  $a \in F(p^n)$  to jest ono pierwiastkiem wielomianu  $X^{p^n} - X$ , czyli  $a$  jest algebraiczne nad  $F(p)$ .
3. Pierwiastki przestępne to na przykład  $e, \pi, E^\pi$ , aczkolwiek nie jesteśmy pewni tego ostatniego [doczytać w S. Lang, Algebra].
4. Rozważamy  $K \subseteq L = K(X)$ , czyli pierścień ułamków. Weźmy  $x \in K(X)$  - przestępny nad  $K$ . Załóżmy, że istnieje wielomian  $f \in K[X]$  różny od 0. I założmy, że  $0 = \widehat{f}(X)$  to funkcja wielomianowa.

$$0 = \widehat{f}(X) = f \neq 0$$

i jest to sprzeczność.

**Uwaga 4.2.** Niech  $a$  jak wyżej. Wtedy  $a$  jest algebraiczny nad  $K \iff I(a/K) \neq \{0\}$  jako ideał  $K[X]$ .

### 4.1 Wymiar przestrzeni liniowej

Niech  $K \subseteq L$  będzie rozszerzeniem ciała  $K$ . Wtedy  $L$  jest **przestrzenią liniową nad  $K$** . Definiujemy stopień rozszerzenia [coś innego jak indeks przy grupach]

$$[L : K] := \dim_K(L)$$

jako **wymiar przestrzeni liniowej** nad  $K$ .

**Uwaga 4.3.** Niech  $a \in L \setminus K$ . Następujące warunki są równoważne:

1.  $a$  jest algebraiczny nad  $K$
2.  $K[a] = K(a)$ , to znaczy  $K[a]$  jest ciałem (usuwanie niewymierności z mianownika)
3.  $[K(a) : K] = \dim_K(a) < \infty$

**Dowód.**  $1 \implies 2$

Wystarczy pokazać, że  $K[a]$  jest ciałem. Rozważamy  $I(a/K) \triangleleft K[X]$ . Wiemy, że  $K[X]$  jest PID, więc potrzebujemy, aby  $I(a/K)$  było ideałem pierwszym.

$$f \cdot g \in I(a/K) \iff 0 = \widehat{f \cdot g}(a)$$

gdzie daszek oznacza homomorfizm ewaluacji, który jest również homomorfizmem w punkcie. Czyli

$$\widehat{f \cdot g}(a) = \widehat{f}(a)\widehat{g}(a) = 0 \iff \widehat{f}(a) = 0 \vee \widehat{g}(a) = 0.$$

Czyli  $I(a/K)$  jest ideałem pierwszym w pierścieniu PID, więc jest ideałem maksymalnym. Mamy więc, że

$$K[a]/I(a/K)$$



jest ciałem, więc jest izomorficzne z  $K(a)$ , bo  $K[a]$  to najmniejszy pierścień generowany przez  $K \cup \{a\}$  (tutaj pierścień), a  $K(a)$  to najmniejsze ciało generowane przez  $K \cup \{a\}$ .

2  $\implies$  3

Założmy, że  $a \neq 0$ . Wtedy  $a^{-1} \in K[a]$ , czyli istnieje wielomian  $f \in K[X]$

$$f(x) = \sum_{i=1}^n b_i x^i, \quad b_n \neq 0$$

taki, że  $a^{-1} = f(a)$ . Wobec tego mamy

$$1 = f(a) \cdot a$$

$$0 = f(a)a - 1 = b_n a^{n+1} + b_{n-1} a^n + \dots + b_0 a - 1,$$

stąd mamy, że

$$a^{n+1} = -\frac{1}{b_n}(b_{n-1}a^n + \dots + b_0 a - 1) \in \text{Lin}_K(1, a, \dots, a^n)$$

jest w domknięciu liniowym  $(1, a, \dots, a^n)$ . Indukcyjnie pokazujemy, że

$$(\forall m \geq 0) a^m \in \text{Lin}_K(1, a, \dots, a^n).$$

1.  $m = 0, \dots, n+1$  bo one są już w  $\text{Lin}_K(1, a, \dots, a^n)$ .

2. Zakładamy teraz, że dla  $m$  mamy

$$a^m = \sum_{i=0}^n c_i a^i$$

i pokazujemy dla  $m+1$ .

$$a^{m+1} = a \cdot a^m = a \sum_{i=0}^n c_i a^i = \sum_{i=0}^n c_i a^{i+1} \in \text{Lin}_K(1, a, \dots, a^n),$$

bo  $a^{n+1} \in \text{Lin}_K(1, a, \dots, a^n)$ .

Czyli

$$K[a] = K(a) = \text{Lin}_K(1, a, \dots, a^n),$$

co daje, że  $[K(a) : K] \leq n < \infty$ .

3  $\implies$  1

$[K(a) : K] < \infty$ , z czego wynika, że

$$\{1, a, \dots, a^n, \dots\} = \{a^t : t \in \mathbb{N}\} \subseteq K(a)$$

jest zbiorem liniowo zależnym. Z liniowej zależności wiemy, że

$$(\exists n \in \mathbb{N})(\exists b_{n-1}, \dots, b_0) a^n = b_{n-1}a^{n-1} + \dots + b_1 a + b_0.$$

Stąd dla  $f \in K[X]$  zadanego wzorem

$$f(x) = b_{n-1}x^{n-1} + \dots + b_0 - x^n$$

mamy  $f(a) = 0$ , zatem  $a$  jest algebraiczny nad  $K$ . 

**Definicja 4.4.** Niech  $a \in L \supseteq K$  będzie algebraicznym pierwiastkiem nad  $K$ ,  $I(a/K) = \{w \in K[X] : w(a) = 0\} = (f)$ ,  $f \neq 0$ ,  $f \in K[X]$ ,  $f$  unormowany (ang. monic)

- $f$  jest nazywany wielomianem **minimalnym**  $a$  nad  $K$  (wyznaczony jednoznacznie)
- **stopień**  $a$  nad  $K$  jest definiowany jako  $\deg(f)$ .

**Uwaga 4.5.** Załóżmy, że  $L(a/K) = (f)$  i  $f$  jest unormowany. Wówczas:

1.  $f$  jest unormowanym wielomianem minimalnego stopnia takim, że  $f(a) = 0$
2.  $\deg(f) = [K(a) : K]$ , czyli stopień tego wielomianu jest równy stopniu przestrzeni liniowej  $K(a)$  nad  $K$ .

**Dowód.**

1. Oczywiście **DOWODZIK, ZE IRREDUCIBLE JEST MINIMAL**
2. Niech  $n = \deg(f)$ ,

$$f(x) = x^n + \sum_{k < n} b_k x^k$$

Z tego, że  $f(a) = 0$  mamy, że

$$a^n = - \sum_{k < n} b_k a^k \in \text{Lin}_K(1, a, \dots, a^{n-1}) \subseteq L.$$

Czyli  $K(a) = \text{Lin}_K(1, a, \dots, a^{n-1})$  i wystarczy zobaczyć, że  $\{1, \dots, a^{n-1}\}$  jest liniowo niezależny. W przeciwnym przypadku dla pewnego  $0 < r < n$   $a^r \in \text{Lin}_K(1, a, \dots, a^{r-1})$ , czyli istnieje wielomian taki, że  $a$  jest jego pierwiastkiem, a stopień jest nie większy niż  $r < n$  i to daje sprzeczność.

Czyli  $\text{Lin}_K(1, a, \dots, a^n)$  jest bazą  $K(a)$  nad  $K$  i koniec.



**Przykład:**

1.  $\sqrt{2} \in \mathbb{R} \supseteq \mathbb{Q}$ , wtedy  $f(x) = x^2 - 2$  jest wielomianem minimalnym  $\sqrt{2}$  nad  $\mathbb{Q}$  i stopień  $\sqrt{2}$  nad  $\mathbb{Q}$  jest równy 2.
2.  $\pi \in \mathbb{R}$  nie ma stopnia, bo  $\pi$  nie jest liczbą algebraiczną nad  $\mathbb{Q}$
3.  $\sqrt[7]{7} + \sqrt[3]{3} - \sqrt[6]{6} \in \mathbb{R}$ , czy jest to algebraiczne nad  $\mathbb{Q}$ ? Tak i ma stopień 126.

Jeśli  $K \subseteq L \ni a$  jest algebraiczny, to  $\deg(a/K) = n$ , to

$$K(a) = K[a] = \left\{ \sum_{i=0}^{n-1} b_i a^i : b_i \in K \right\}$$

**Fakt 4.6.** Niech  $K \subseteq L \subseteq M$  będą rozszerzeniami ciał. Wtedy

$$[M : K] = [M : L] \cdot [L : K]$$

**Dowód.** Niech  $\{e_i : i \in I\}$  będzie bazą  $L$  nad  $K$ , a  $\{f_j : j \in J\}$  będzie bazą  $M$  nad  $L$ . Stąd  $|I| = [L : K]$  i  $|J| = [M : L]$ .

Chcemy za pomocą tych dwóch zbiorów zrobić bazę  $M$  nad  $K$ . Rozważmy zbiór

$$X = \{e_i \cdot f_j : i \in I, j \in J\}.$$

Musimy pokazać, że

1.  $X$  jest liniowo niezależny
2.  $X$  jest bazą  $M$  nad  $K$
3.  $|X| = |I| \cdot |J|$

Czyli  $X$  jest bazą  $M$  nad  $K$  (1.,2.) i ma odpowiednią moc (3.).

1. Załóżmy nie wprost, że  $X$  nie jest l.n.z., czyli istnieją  $k_{ij} \in K$  takie, że

$$\sum_{j \in J} \sum_{i \in I} k_{ij} e_i f_j = 0,$$

ale  $\sum_i k_{ij}e_i = l_j$  są elementami  $L$ , czyli

$$\sum_{j \in I} l_j f_j = 0$$

więc  $f_j$  są liniowo zależne, a przecież były bazowe, w takim razie

$$0 = l_j = \sum_{i \in I} k_{ij}e_i,$$

$e_i \neq 0$ , czyli  $k_{ij} = 0$  i koniec.

2.  $X$  generuje  $M$  nad  $K$ , bo dla  $m \in M$  mam

$$m = \sum l_j f_j = \sum \left( \sum a_{ij} e_i \right) f_j = \sum \sum a_{ij} e_i f_j = \sum \sum k_{ij} e_i f_j$$

3. Załóżmy, nie wprost, że dla  $i \neq i'$  i  $j \neq j'$   $e_i f_j = e_{i'} f_{j'}$ . Czyli

$$e_i f_j - e_{i'} f_{j'} = 0,$$

czyli  $f_j, f_{j'}$  są liniowo zależne nad  $L$ , czyli mamy, że  $f_j = f_{j'}$  i

$$0 = e_i f_j - e_{i'} f_j = (e_i - e_{i'}) f_j \implies e_i - e_{i'} = 0 \implies i = i'$$

Z tego wynika, że  $[M : K] = |X| = |I||J| = [L : K][M : L]$ .



**Wniosek 4.7.** Niech  $K \subseteq L$  będzie rozszerzeniem skończonego ciała. Niech

$$K_{\text{alg}}(L) = \{a \in L : a \text{ jest algebraiczny nad } K\}.$$

Okazuje się, że  $K_{\text{alg}}$  jest podciałem.

**Dowód.** Weźmy  $a, b \in K_{\text{alg}}$ . Wiemy, że  $[K(a) : K]$  i  $[K(b) : K]$  są skończone. Mamy, że

$$K \subseteq K(a) \subseteq K(a, b)$$

Z faktu ?? wiemy, że

$$[K(a, b) : K] = [K(a, b) : K(a)] \cdot [K(a) : K]$$

czyli również  $K(a, b)$  jest skończone. Zatem dla  $x \in K(a, b)$  mamy

$$[K(x) : K] \leq [K(a, b) : K]$$

też jest skończone, zatem  $x$  jest algebraiczny nad  $K$ .

Dla  $x \in K(a, b)$  mamy  $[K(x) : K] \leq [K(a) : K]$ , czyli również jest skończone. W takim razie,  $x$  jest algebraiczny nad  $K$  i należy do  $K_{\text{alg}}$ .



### Definicja 4.8.

1.  $K_{\text{alg}}(L)$  nazywamy **algebraicznym domknięciem**  $K$  w  $L$ .
2.  $K$  jest **relatywnie algebraicznie domknięte** w  $L \iff K_{\text{alg}}(L) = K$ .

### Przykłady:

1.  $\mathbb{Q}_{\text{alg}}(\mathbb{C}) := \hat{\mathbb{Q}} = \mathbb{Q}^{\text{alg}}$  jest to tak zwane **ciało liczb algebraicznych**.  $\hat{\mathbb{Q}}$  jest przeliczalne, bo  $\mathbb{Q}[x]$  jest przeliczalne, więc jest mnóstwo liczb **przestępnych** (zespólnych, które nie są algebraiczne, ale nie potrafimy żadnej wskazać).
2.  $K$  jest algebraicznie domknięte w  $K(X)$

3.  $\frac{1}{\sqrt[3]{2}+\sqrt{3}} \in \mathbb{Q}[\sqrt{3}, \sqrt[3]{2}]$ , bo  $\mathbb{Q}[\sqrt{3}, \sqrt[3]{2}]$  jest ciałem

$$L = \underbrace{\mathbb{Q}[\sqrt[3]{2}, \sqrt{2}]}_{\subseteq \mathbb{C}} = \underbrace{\mathbb{Q}[\sqrt[3]{2}]}_{\substack{\text{ciało} \\ \sqrt[3]{2} \text{ alg. w } \mathbb{Q}}}[\sqrt{3}] \mathbb{Q} = \{a + b\sqrt[3]{2} + c\sqrt[3]{2}^2 : a, b, c \in \mathbb{Q}(\sqrt{3})\}$$

$$\sqrt[3]{2} + \sqrt{3} \in L \implies \frac{1}{\sqrt[3]{2} + \sqrt{3}} \in L$$

## Wykład 5: Wielomiany koła, domknięcia algebraiczne

**Uwaga 5.1.** Niech  $K \subseteq L \subseteq M$  będą rozszerzeniami ciał.  $K \subseteq M$  jest algebraiczne  $\iff K \subseteq L$  i  $L \subseteq M$  są algebraiczne

**Dowód.**

$\implies$  OK

$\impliedby$

Weźmy dowolny  $m \in M$ .  $L \subseteq M$  jest algebraiczny, co oznacza  $f(m) = 0$ , gdzie  $f \in L[X]$

$$f = \sum_{i=0}^n a_n x^i, \quad a_n \neq 0$$

W takim razie  $m$  jest algebraiczne nad ciałem  $K(a_0, \dots, a_n)$ . Ale teraz

$$[K(m) : K] \leq [K(a_0, \dots, a_n, m) : K] \stackrel{4.6}{=} [K(a_0, \dots, a_n, m) : K(a_0, \dots, a_n)] [K(a_0, \dots, a_n) : K] < \infty$$

bo  $m$  jest algebraiczny  $K(\bar{a})$ . Czyli

$$[K(m) : K] < \infty$$

więc  $m$  jest algebraiczny nad  $K$  (uwaga 4.3). ☕

**Uwaga 5.2.**  $K_{\text{alg}}(L)$  jest relatywnie algebraicznie domknięty w  $L$ . To znaczy  $(K_{\text{alg}}(L))_{\text{alg}}(L) = K_{\text{alg}}(L)$ .

**Dowód.** Ćwiczenia. ☕

### 5.1 Wielomian rozkładu koła [cyclotomic polynomials]

Rozważamy wielomian

$$w_m(x) = x^m - 1$$

dla  $m \in \mathbb{N}$ . Wiemy, że

- pierwiastki  $w_m$  w  $\mathbb{C}$  są jednokrotne
- $\mu_m(\mathbb{C})$  jest grupą cykliczną
- $a \in \mu_m(\mathbb{C})$  jest generatorem  $\mu_m(\mathbb{C}) = \{a^i : 0 \leq i \leq m\} \cong (\mathbb{Z}_m, +)$
- $a^k$  generuje  $\mu_m(\mathbb{C}) \iff \text{NWD}(k, m) = 1$

**Funkcja Eulera:**

$$\phi(m) = |\{k \in \mathbb{N} : 0 \leq k < m, \text{NWD}(k, m) = 1\}|$$

$\mu_m(\mathbb{C})$  ma  $\phi(m)$  generatorów.

Niech

$$\{k \in \mathbb{N} : 0 < k < m, \text{NWD}(k, m) = 1\} = \{m_1, \dots, m_{\phi(m)}\}$$

i zdefiniujmy

$$F_m(x) := (x - a^{m_1}) \dots (x - a^{m_{\phi(m)}}) \in \mathbb{C}[X]$$

$F_m$  to  $m$ -ty wielomian cyklotoniczny.

**Uwaga 5.3.**

1.  $w_m(x) = x^m - 1 = F_m(x) \cdot v_m(x) = F_m(x) \cdot \prod_{\substack{d|m \\ d < m}} F_d(x)$
2.  $F_m(x) \in \mathbb{Z}[X]$

**Dowód:**

1. Wiemy, że wielomian  $w_m$  ma  $m$  pierwiastków na płaszczyźnie Gaussa, więc jest iloczynem dwumianów  $x - b$ ,  $b \in \mu_m(\mathbb{C})$ , czyli

$$\alpha \in \mu_m(\mathbb{C}) \implies \alpha^d - 1 \quad d = \text{ord}(\alpha), d|m$$

Wtedy  $\alpha$  jest pierwiastkiem pierwotnym z 1 stopnia  $d$ . Wobec tego

$$F_d(x) = \prod_{\substack{\alpha \in \mu_m(\mathbb{C}) \\ \text{ord}(\alpha)=d}} (x - \alpha) \implies (\text{teza})$$

2. Dowód przez indukcję względem  $m$ . Dla  $m = 1$  mamy  $F_m(x) = x - 1 \in \mathbb{Z}[X]$ .

Teraz zakładamy, że dla wszystkich  $0 < d < m$  jest  $F_d(x) \in \mathbb{Z}[X]$ . Z punktu (1) wiemy, że

$$x^m - 1 = w_m(x) = F_m(x)v_m(x)$$

z założenia indukcyjnego  $v_m(x) \in \mathbb{Z}[X]$ , bo jest iloczynem  $\prod_{\substack{\alpha \in \mu_m(\mathbb{C}) \\ \text{ord}(\alpha)=d}} (x - \alpha)$

$w_m(x)$  w  $\mathbb{Z}[X]$  jest podzielny przez  $v_m$  i dostajemy:

$$w_m(x) = v_m(x) \cdot L(x)$$

ale w  $\mathbb{C}[X] \supseteq \mathbb{Z}[X]$  było

$$w_m(x) = v_m(x) \cdot F_m(x),$$

czyli  $F_m = L \in \mathbb{Z}[X]$ .

**Uwaga 5.4.** [Lemat Gaussa]  $F_m(x)$  jest wielomianem nierozkładalnym w  $\mathbb{Q}[X]$  (równoważnie w  $\mathbb{Z}[X]$ ).

**Dowód:**

Po pierwsze zauważmy, że  $F_m$  jest nierozkładalny w  $\mathbb{Q}[X] \iff$  nierozkładalny w  $\mathbb{Z}[X]$ .

Założmy nie wprost, że

$$F_m(x) = G_1(x) \cdot G_2(x)$$

dla  $G_1, G_2 \in \mathbb{Z}[X]$ . Możemy założyć, że  $G_1(x)$  jest dalej nierozkładalny w  $\mathbb{Z}[X]$  oraz  $0 < \deg(G_1) < \deg(F_m) = \phi(m)$

**Lemat:** Istnieje  $\varepsilon'$ -pierwiastek  $G_1$  oraz liczba pierwsza  $p$  taka, że  $p \nmid m$  i  $G_1(b) = G_2(b^p) = 0$ .

**Dowód lematu:**

Niech  $\varepsilon$  będzie jakimś pierwiastkiem  $G_1$ , a  $\tau$  będzie jakimś pierwiastkiem  $G_2$ . W takim razie

$$\tau, \varepsilon \in \mu_m(\mathbb{C}) \implies \tau = \varepsilon^l$$

dla pewnego  $l$  takiego, że  $\text{NWD}(l, m) = 1$ .

Niech  $l = p_1 \cdot \dots \cdot p_s$  będzie rozkładem na liczby pierwsze. Wtedy mamy ciąg różnych liczb

$$\text{pierwiastek } G_1 = \varepsilon, \varepsilon^{p_1}, \varepsilon^{p_1 p_2}, \dots, \varepsilon^{p_1 \dots p_s} = \tau \text{ pierwiastek } G_2$$

które są pierwiastkami pierwotnymi stopnia  $m$ . Z tego wynika, że każda z tych liczb jest pierwiastkiem  $G_1$  lub  $G_2$ , czyli istnieje taka pozycja  $i$ , że

$$G_1(\varepsilon^{p_1 \dots p_i}) = 0,$$

$$G_2(\varepsilon^{p_1 \dots p_{i+1}}) = 0$$

wtedy  $\varepsilon' := \varepsilon^{p_1 \dots p_i}$  oraz  $p = p_{i+1}$  i lemat jest spełniony.

Wimy już, że  $G_1(\varepsilon) = 0$  i  $G_1 \in \mathbb{Z}[X]$  jest wielomianem nierozkładalnym. Niech  $p$  będzie liczbą pierwszą z lematu. Rozważmy

$$G_3(x) = G_2(x^p).$$

Wtedy  $G_2(\varepsilon^p) = G_3(\varepsilon) = 0$ , ale stąd wynika, że  $G_1(x)$  dzieli  $G_3(x)$ . Niech więc

$$G_3(x) = G_1(x)H(x) \in \mathbb{Z}[X].$$

Rozważmy homomorfizm

$$f: \mathbb{Z} \rightarrow \mathbb{Z}_p\mathbb{Z}/p\mathbb{Z} =$$

i indukowany przez niego epimorfizm pierścieni

$$\bar{f}: \mathbb{Z}[X] \rightarrow \mathbb{Z}_p[X].$$

Z założenia  $F_m = G_1G_2$  mamy, że

$$\bar{f}(F_m) = \bar{f}(G_1)\bar{f}(G_2)$$

a z rozumowania powyżej ( $G_3 = G_1H$ )

$$\bar{f}(G_3) = \bar{f}(G_1)\bar{f}(H)$$

ale

$$\bar{f}(G_3(x)) = \bar{f}(G_2(x^p)) = \bar{f}(G_2(x))^p,$$

bo współczynniki  $\bar{f}(G_2(x^p))$  są w  $\mathbb{Z}_p$ , a  $(\sum c_i x^i)^p = \sum c_i^p x^{ip}$ , bo  $c_i^{kp} = c_i^k$  dla  $c_i \in \mathbb{Z}_p$ .

Stąd wiemy, że

$$\bar{f}(G_2(x))^p = \bar{f}(G_1)\bar{f}(H).$$

Pierścień  $\mathbb{Z}_p[X]$  jest UFD, więc  $\bar{f}(G_1)$  i  $\bar{f}(G_2)$  mają wspólny dzielnik w  $\mathbb{Z}_p[X]$ , stopnia co najmniej 1. Zatem z

$$\bar{f}(F_m) = \bar{f}(G_1)\bar{f}(G_2)$$

$$\bar{f}(F_m)|\bar{f}(w_m) = x^m - 1.$$

Zatem w pewnym rozszerzeniu  $L \supseteq \mathbb{Z}_p$   $w_m$  ma pierwiastek wielokrotny co daje sprzeczność.

**Uwaga 5.5.** Jeżeli  $\varepsilon \in \mathbb{C}$  jest pierwiastkiem pierwotnym z 1 stopnia  $m$ , to  $[\mathbb{Q}(\varepsilon) : \mathbb{Q}] = \phi(m)$ .

**Dowód:**  $F_m(x) \in \mathbb{Q}[X]$  jest nierozkładalny, a  $\varepsilon$  jest jego pierwiastkiem. To znaczy, że  $F_m(x)$  jest wielomianem minimalnym dla  $\varepsilon$  nad  $\mathbb{Q}$ . Mamy, że  $[\mathbb{Q}(\varepsilon) : \mathbb{Q}] = \deg F_m = \phi(m)$ .

**Lemat 5.6.** [lemat Liouville'a o aproksymacji diofantycznej]: Jeżeli  $a \in \mathbb{R}$  jest liczbą algebraiczną stopnia  $N > 1$ , to istnieje  $c = c(a) \in \mathbb{R}_+$  takie, że dla każdego  $r = \frac{p}{q} \in \mathbb{Q}$  zachodzi

$$\left| a - \frac{p}{q} \right| \geq \frac{c}{q^N}$$

Lemat Liouville'a mówi o cesze. Jeżeli liczba nie spełnia tego lematu, to jest **liczbą przestępną**.

**Dowód.** Niech  $N > 1$  i  $a \in \mathbb{Q}$ . Niech  $f \in \mathbb{Z}[X]$  taki, że  $f(a) = 0$  i  $\deg(f) = \deg(a/\mathbb{Q})$ . Teraz zauważmy, że na  $f$  patrzymy jako na funkcję wielomianową. To znaczy, dla każdego  $x \in \mathbb{R}$  patrząc na

$$\hat{f}(x) = \hat{f}(x) - \underbrace{\hat{f}(a)}_{=0}$$



ale funkcje wielomianowe są różniczkowalne. Dlatego możemy skorzystać z theoremierdzenia o wartości średniej. To znaczy

$$\widehat{f}(x) - \widehat{f}(a) = \widehat{f}'(x-a)$$

My wiemy, że  $a$  jest pierwiastkiem jednokrotnym wielomianu  $f(x)$ . Niech  $\varepsilon > 0$  takie, że  $a \in (a - \varepsilon, a + \varepsilon)$  jest jedynym pierwiastkiem  $f(x)$  w tym przedziale. Oczywiście,

$$\deg(\widehat{f}'(x)) < \deg(\widehat{f}(x)) \implies \widehat{f}'(a) \neq 0.$$

Bez straty ogólności  $\widehat{f}'(a) > 0$ . Niech  $i$  i  $d = \sup_{x \in I} \widehat{f}'(x)$ .

$$c = c(a) = \min(\varepsilon, \frac{1}{d}).$$

Udowodnimy, że  $c$  jest dobrze określona. Niech  $r = \frac{p}{q} \in \mathbb{Q}$  i  $p, q \in \mathbb{Z}, q > 0$ .

$$f(x) = \sum_{k=0}^N a_k x^k, \quad a_k \in \mathbb{Z}, a_N \neq 0$$

Rozważamy przypadki:

1.  $f \notin I$ . Wtedy  $\left|a - \frac{p}{q}\right| \geq \varepsilon \geq \frac{\varepsilon}{q^N} \geq \frac{c}{q^N}$
2.  $f \in I$ . Wtedy  $\left|a - \frac{p}{q}\right|$  i  $\frac{p}{q}$  może być naszym  $x$ . Czyli

$$\left|a - \frac{p}{q}\right| = \frac{|f(\frac{p}{q})|}{|f'(\frac{p}{q})|} \geq \frac{|f(\frac{p}{q})|}{d} \geq \frac{c}{q^N}$$

bo  $c \leq \frac{1}{d}$

$$0 \neq |f(\frac{p}{q})| = \left| \sum_{k=0}^N a_k \frac{p^k}{q^k} \right| = \frac{\left| \sum_{k=0}^N a_k p^k q^{N-k} \right|}{q^N} \geq \frac{1}{q^N}$$



## 5.2 Domknięcia algebraiczne

**Definicja 5.7.** Ciało  $L \supseteq K$  jest **algebraicznym domknięciem**  $K$  wtedy i tylko wtedy, gdy:

1.  $L$  jest algebraicznie domknięte
2.  $L \supseteq K$  jest rozszerzeniem algebraicznym, to znaczy dla każdego  $a \in L$   $a$  jest pierwiastkiem algebraicznym nad  $K$

Takie  $L$  oznaczamy przez  $\widehat{K}, K^{\text{alg}}$ .

**Uwaga 5.8.** Dla każdego  $K$  istnieje algebraiczne domknięcie  $\widehat{K}$ .

**Dowód.** Rozważmy  $K_{\infty} \supseteq K$  - ciało algebraicznie domknięte (theoremierdzenie z początku wykładu). Pokażemy, że

$$\widehat{K} = K_{\text{alg}}(K_{\infty}) = \{a \in K_{\infty} : a \text{ algebraiczny nad } K\}$$

1.  $\widehat{K}$  jest algebraicznie domknięte:

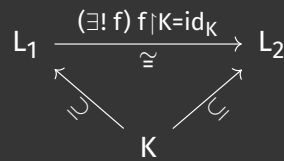
Jeżeli  $f \in \widehat{K}[X]$ , to  $f$  ma pierwiastek w  $K$ , ale  $\widehat{K} \subseteq K_{\infty}$ , to znaczy, że  $a \in \widehat{K}$  jest algebraiczne nad  $K$ .

2.  $K \subseteq \widehat{K}$  jest rozszerzeniem algebraicznym:

$K \subseteq \widehat{K} = K_{\text{alg}}(K_\infty)$  z definicji jest rozszerzeniem algebraicznym.



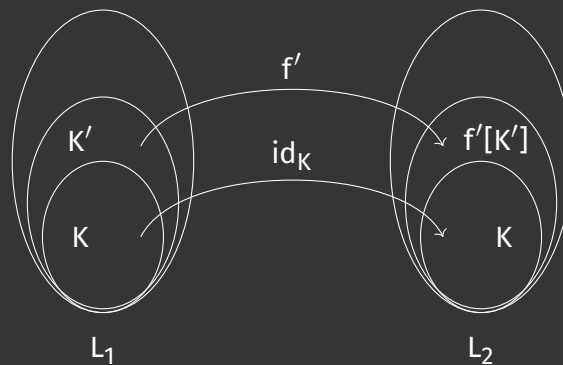
**Twierdzenie 5.9.**  $\widehat{K}$  jest jedyne z dokładnością do izomorfizmu nad  $K$ .



**Dowód.** Można użyć indukcji pozaskończonej, a można też użyć lematu Zorna. My zrobimy to drugie.

Niech

$$\mathfrak{K} = \{(K', f') : K \subseteq K' \subseteq L_1, f' : K' \xrightarrow{1-1} L_2, f' \upharpoonright K = \text{id}_K\}$$



Oczywiście,  $\mathfrak{K} \neq \emptyset$ , bo  $(K, \text{id}_K) \in \mathfrak{K}$ . W  $\mathfrak{K}$  definiujemy relację porządku w naturalny sposób, to znaczy

$$(K', f') \leq (K'', f'') \iff K' \subseteq K'' \wedge f'' \upharpoonright K' = f'.$$

Wtedy  $(\mathfrak{K}, \leq)$  jest zbiorem częściowo uporządkowanym i niepustym (bo jest  $(K, \text{id}_K) \in \mathfrak{K}$ ). Ponadto każdy wstępujący łańcuch  $(\mathfrak{K}, \leq)$  ma ograniczenie górne. Na mocy lematu Kuratowskiego-Zorna w tej rodzinie istnieje element maksymalny, nazwijmy go  $(K_1, f_1)$ . Pokażemy, że  $K_1 = L_1$ .

Założmy nie wprost, że istnieje  $a \in L_1 \setminus K_1$ . Niech  $w(x) \in K_1[X]$  będzie wielomianem minimalnym elementu  $a$  nad  $K_1$ . Niech

$$K_2 = f_1[K_1]$$

$$v(x) = f_1(a_0) + f_1(a_1)x + \dots + f_1(a_n)x^n \in K_2[X].$$

$v(x)$  też jest nierozkładalny nad  $K_2$ , bo  $w(x)$  był nierozkładalny nad  $K_1$ . Niech  $b \in L_2$  będzie pierwiastkiem wielomianu  $v$ .

Zauważmy, że  $K_1(a) = K_1[a]$ , bo  $w(x)$  jest nierozkładalny nad  $K_1$ , ale

$$K_1[a] \simeq K_1[X]/(w) \simeq K_2[X]/(v) \simeq K_2[b] \simeq K_2(b).$$

Czyli  $K_1(a) \simeq K_2(b)$  i  $f_2 : K_1(a) \xrightarrow{\cong} K_2(b)$  jest izomorfizmem rozszerzającym  $f_1$ . Wtedy mamy  $(K_1, f_1) \leq (K_1(a), f_2)$ , co daje sprzeczność z maksymalnością  $(K_1, f_1)$ . Zatem  $L_1 = K_1$ .

Zrobimy sprytnie wprost:  $K_1 = L_1$ ,  $K \subseteq K_2 \subseteq L_2$  i  $K_1 \cong_K K_2$ .  $K_1$  jest algebraicznie domknięte, więc  $K_2$  też takie musi być. Czyli  $K \subseteq K_2 \subseteq L_2$  jest algebraiczne, więc  $K_2 = L_2$ , bo założyliśmy, że  $b \in L_2 \setminus K_2$  i wtedy wielomina minimalny  $f_b(x) \in K_2[X]$  ma pierwiastek  $c \in K_2$ , czyli  $(x - c) | f_b(x)$  a więc  $x - c = f_b(x)$  jest nierozkładalny i  $b = c$ .



**Wniosek 5.10.** Jeśli  $K \cong L$ , to  $\widehat{K} \cong \widehat{L}$ . Dokładniej, jeżeli  $f_0 : LK \rightarrow L$  jest izomorfizmem ciał, to istnieje izomorfizm  $f : \widehat{K} \rightarrow \widehat{L}$  taki, że  $f \upharpoonright K = f_0$ .

**Dowód.** Ćwiczenia



**Uwaga 5.11.** Jeśli  $K \subseteq L$  jest algebraicznym rozszerzeniem ciał, to istnieje monomorfizm  $f : L \rightarrow \widehat{K}$  taki, że  $f|_K = \text{id}_K$ .

**Dowód.** Ćwiczenie



## Wykład 6: Wstęp do teorii Galois

### 6.1 Grupy Galois

Niech  $K$  będzie ciałem,  $\hat{K}$  jego algebraicznym domknięciem. Niech  $K \subseteq L$  będzie rozszerzeniem algebraicznym ciał [BSO:  $L \subseteq \hat{K}$ ]. **Grupą Galois** rozszerzenia  $K \subseteq L$  nazywamy

$$G(L/K) = \text{Gal}(L/K) = \{f \in \text{Aut}(L) : f \upharpoonright K = \text{id}_K\} = \text{Aut}(L/K)$$

ze składaniem jako działaniem. Jest to jednocześnie podgrupa wszystkich automorfizmów.

**Przykład:**

- Niech  $K$  będzie ciałem prostym ( $\cong \mathbb{Q}$  lub  $\mathbb{Z}_p$ ). Wtedy  $\text{Gal}(L/K) = \text{Aut}(L)$ , bo
  - Niech  $\text{char}(K) = \text{char}(L) = p > 0$  i niech  $f \in \text{Aut}(L)$ . Wtedy  $f(1) = 1$ ,  $f(\underbrace{1 + \dots + 1}_k) = \underbrace{1 + \dots + 1}_k$ , a ponieważ  $K = \{\underbrace{1 + \dots + 1}_k : k \in \{1, \dots, p\}\}$ , zatem  $f \upharpoonright K = \text{id}_K$ , czyli  $f \in \text{Gal}(L/K)$ .
  - Niech  $\text{char}(K) = \text{char}(L) = 0$ , wtedy  $K \cong \mathbb{Q}$ . Niech  $f \in \text{Aut}(L)$ . Wtedy  $f(0) = 0$ ,  $f(1) = 1$ , a dla dowolnego  $k \in \mathbb{N}$   $f(\underbrace{1 + \dots + 1}_k) = \underbrace{1 + \dots + 1}_k$ , stąd dostajemy, że  $f(n) = n$  dla  $n \in \mathbb{Z}$ , a z własności  $\mathbb{Q}$  dostajemy, że  $f(\frac{m}{n}) = \frac{m}{n}$ , zatem  $f \upharpoonright K = \text{id}_K$ .
- $\text{Gal}(\mathbb{Q}(\sqrt{2})/\mathbb{Q}) = \text{Aut}(\mathbb{Q}(\sqrt{2})) = \{f_0, f_1\} \cong \mathbb{Z}_2$ , bo  $\sqrt{2}$  może przejść na siebie albo na  $-\sqrt{2}$ . Wtedy  $f_0 = \text{id}$ , a  $f_1(-\sqrt{2})$

Grupę Galois  $\text{Gal}(\hat{K}/K)$  nazywamy **absolutną grupą Galois** ciała  $K$ .

Czy każda grupa skończona jest izomorficzna z  $\text{Gal}(L/\mathbb{Q})$  dla pewnego  $\mathbb{Q} \subseteq L$ ? Jest to otwarty problem teorii Galois.

**Uwaga 6.1.**  $a, b \in \hat{K}$ , takie, że  $I(a/K) = I(b/K)$ , to wtedy istnieje  $f \in \text{Gal}(\hat{K}/K)$  takie, że  $f(a) = b$ .

**Dowód.**

$$\begin{array}{ccc} K[a] & \xrightarrow[\cong]{f} & K[b] \\ \downarrow \subseteq & & \downarrow \subseteq \\ K[a]^{\text{alg}} = \hat{K} & \xrightarrow[\cong]{\exists f'} & \hat{K} = K[b]^{\text{alg}} \end{array}$$

Co jest wnioskiem z wniosku 5.10.



### 6.2 Rozszerzenia algebraiczne normalne

$\hat{K}$  jest największym algebraicznym rozszerzeniem  $K$  tzn.  $K \subseteq L$  oznacza, że istnieje  $f : L \rightarrow \hat{K}$  monomorfizm ciał taki, że  $f \upharpoonright K = \text{id}_K$ . ☕

Mówmy, że rozszerzenie algebraiczne  $K \subseteq L$  jest **normalne**, gdy w ☕  $f[L] \subseteq \hat{K}$  dla wszystkich  $f : L \rightarrow K$ .

**Przykład** Rozszerzenie  $K \subseteq \hat{K}$  jest normalne.

**Uwaga 6.2.** Załóżmy, że  $K \subseteq L \subseteq \hat{K}$ . Wtedy rozszerzenie  $K \subseteq L$  jest normalne  $\iff$  dla każdego  $f \in \text{Gal}(\hat{K}/K)$   $f[L] = L$ .

**Dowód.**  $\implies$  z definicji, bo  $\text{id}_K[L] = L$ .

$\impliedby$  z definicji.



Czyli  $K \subseteq L_1 \subseteq L$  i  $K \subseteq L$  jest normalna, to  $L_1 \subseteq L(\subseteq \widehat{K})$ , więc  $\text{Gal}(\widehat{L}_1/L_1) \leq \text{Gal}(\widehat{K}/K)$ .

**Twierdzenie 6.3.** Dla  $K \subseteq L$  algebraicznego rozszerzenia jest normalne  $\iff$  dla każdego  $b \in L$  wielomian minimalny  $f \in K[X]$  rozkłada się w  $L[X]$  na iloczyn czynników liniowych.

**Dowód.** Bez straty ogólności rozważamy  $L \subseteq \widehat{K}$ .

$\implies$

Dowód nie wprost, to znaczy załóżmy, że istnieje  $b \in L$  takie, że  $w_b(x)$  ma pierwiastek  $a \in \widehat{K} \setminus L$ . Ale wtedy z Uwagi 6.1. na jednorodność  $\widehat{K}$  istnieje  $f \in \text{Gal}(\widehat{K}/K)$  takie, że  $f(b) = a$ , więc  $f[L] = L$  co jest sprzeczne z 6.2.

$\impliedby$

Załóżmy nie wprost, że na mocy 6.2. istnieje  $f \in \text{Gal}(\widehat{K}/K)$  takie, że  $f[L] \neq L$ . Ale  $L$  i  $f[L]$  są wzajemnie sprzężone, więc wybierzmy  $a \in L \setminus f[L]$ . Symetrycznie,  $a' \in f[L] \setminus L$ ,  $f' : f[L] \xrightarrow{\cong} L$  spełnia warunek (☝).

Niech  $w_a(x)$  jest wielomianem minimalnym  $a$  nad  $K$ . Wtedy  $w_a(X) = f(w_a(x))$ , bo  $f \upharpoonright K = \text{id}_K$ . Czyli  $w_a$  jest wielomianem minimalnym dla  $b = f(a)/K$ . Czyli  $L \stackrel{f}{\cong} f[L]$ . Z (☝) wiemy, że  $w_a(x)$  rozkłada się nad  $L$  na czynniki liniowe. Czyli  $w_a(x) \dots f[L] \dots$ , co daje nam sprzeczność, bo  $a$  jest pierwiastkiem  $w_a(X)$ , ale  $a \notin f[L]$ . ☕

Rozszerzenie ciał  $K \subseteq L$  jest **skończone**, jeśli  $[L : K] < \infty$ .

**Twierdzenie 6.4.** Niech  $K \subseteq L$  będą rozszerzeniami ciał. Wtedy następujące warunki są równoważne:

1. rozszerzenie  $K \subseteq L$  jest skończone i normalne
2.  $L$  jest ciałem rozkładu pewnego wielomianu

**Dowód.** Bez straty ogólności załóżmy, że  $K \subseteq L \subseteq \widehat{K}$ .

(2)  $\implies$  (1)

Załóżmy, że  $L$  jest ciałem rozkładu pewnego wielomianu. Wtedy  $L = K(a_1, \dots, a_n)$ , gdzie  $a_1, \dots, a_n$  to wszystkie pierwiastki wielomianu  $w(x)$  w  $\widehat{K}$ .

Niech  $f \in \text{Gal}(\widehat{K}/K)$ , wtedy  $f(a_1, \dots, f(a_n))$  to też wszystkie pierwiastki wielomianu  $w(x)$ . Stąd

$$f[L] = K(f(a_1), \dots, f(a_n)) = K(a_1, \dots, a_n) = L,$$

zatem rozszerzenie  $K \subseteq L$  jest normalne i skończone.

(1)  $\implies$  (2)

Niech  $K \subseteq L$  będzie skończone i normalne. Wtedy  $L = K(a_1, \dots, a_n)$  dla pewnych  $a_1, \dots, a_n \in L$  i  $\{a_1, \dots, a_n\}$  będzie bazą  $L$  nad  $K$ . Wtedy istnieje  $w \in K[X] \setminus \{0\}$  takie, że  $w(a_1) = \dots = w(a_n) = 0$ , zatem

$$L \supseteq \{ \text{pierwiastki } w \} \supseteq \{a_1, \dots, a_n\}.$$

**COŚ TUTAJ JEST NIE TAK**



**Przykłady:**

1. Niech  $K \subseteq L$  będą ciałami skończonymi, wtedy  $K \subseteq L$  jest ciałem normalnym, bo  $|L| = p^n$ ,  $w_{p^n-1}(x) = x^{p^n-1} - 1$  i  $L$  jest ciałem rozkładu  $w$  nad  $K$ .
2.  $\mathbb{Q} \subseteq \mathbb{Q}(\sqrt[3]{2})$  to rozszerzenie skończone, ale nie normalne. Jest tak, bo
  - $x^3 - 2$  jest nierozkładalny nad  $\mathbb{Q}$  (kryterium Eisteina)
  - W ciele  $\mathbb{C}$   $x^3 - 2$  ma 3 pierwiastki, z których tylko jeden jest w  $\mathbb{Q}(\sqrt[3]{2}) \subseteq \mathbb{R}$

**Uwaga 6.5.** Niech  $K \subseteq L \subseteq \widehat{K}$  i niech  $L_1$  będzie ciałem generowanym przez  $\bigcup \{f[L] : f \in \text{Gal}(\widehat{K}/K)\}$ . Wtedy  $L_1$  to **normalne domknięcie ciała  $L$  w  $\widehat{K}$** . Wtedy

1. Rozszerzenie  $K \subseteq L_1$  jest normalne
2. Jeśli  $K \subseteq L_2$  i  $L \subseteq L_2$  są normalne, to istnieje monomorfizm  $L_1 \rightarrow L_2$  taki, że  $f \upharpoonright K = \text{id}$ .

**Dowód.** (1) Z 6.2

(2)

Bez straty ogólności założymy, że  $K \subseteq L \subseteq L_2 \subseteq \widehat{K}$  i  $K \subseteq L \subseteq L_2 \subseteq \widehat{K}$ . Niech  $f \in \text{Gal}(\widehat{K}/K)$ ,  $f[L] \subseteq L_2$ . W takim razie  $\bigcup \{f[L] : f \in \text{Gal}(\widehat{K}/K)\} \subseteq L_2$ , z czego wynika, że  $L_1 \subseteq L_2$ . ☕

### 6.3 Rozszerzenia rozdzielcze

- Niech  $K$  będzie ciałem i  $a \in \widehat{K}$ . Mówimy, że  $a$  jest **rozdzielczy nad  $K$** , gdy wielomian minimalny  $a$ ,  $w_a(x) \in K[X]$
- Algebraiczne rozszerzenie  $K \subseteq L$  jest **rozszerzeniem rozdzielczym**, gdy dla każdego  $a \in L$   $a$  jest rozdzielczy nad  $K$ .
- Wielomian  $w(x) \in K[X]$  jest **rozdzielczy**, gdy  $w$  ma tylko pierwiastki jednokrotne w  $\widehat{K}$ .

**Uwaga 6.6.** Założymy, że  $w(x) \in K[X]$  jest wielomianem nierozkładalnym stopnia  $> 0$ . Wtedy

1.  $w(x)$  jest rozdzielczy  $\iff w(x)$  i  $w'(x)$  są względnie pierwsze
2. Jeśli  $\text{char}(K) = 0$ , to  $w$  jest rozdzielczy
3. Jeśli  $\text{char}(K) = p > 0$ , to  $w$  jest nierozdzielczy  $\iff w(x) \in K[X^p]$ , to znaczy  $w(x) = v(x^p)$  dla pewnego  $v(x) \in K[X]$ .

**Dowód.** Dowód zadanie z listy 4 ☕

**Przykłady:**

1. Niech  $K \subseteq L$  będzie rozdzielcze i  $K \subseteq L_1 \subseteq L$ . Wtedy  $L_1 \subseteq L$  też jest rozdzielcze [ćwiczenia]
2. Jeśli  $\text{char}(K) = 0$ , to każde rozszerzenie algebraiczne ciała  $K$  jest rozdzielcze.
3. Niech  $K \subseteq L$  będą ciałami skończonymi. Wtedy  $K \subseteq L$  jest rozdzielcze.

Ciał  $L$  rozkładu wielomianu  $x^{p^n} - x$  o pierwiastkach jednokrotnych.

4. Rozszerzeni nierozdzielnicze: niech  $K = \mathbb{F}_p(X) \subseteq L = K(\sqrt[p]{X})$ . Niech  $w_a(T) = T^p - x \in K[T]$  będzie wielomianem minimalnym  $a = \sqrt[p]{X}$ . Wtedy  $w'_a = 0$ , czyli w ciele  $L$  istnieje  $p$ -krotny pierwiastek  $w_a$ :  $w_a(T) = (t - a)^p \cdot a$

**Lemat 6.7.**

1. Jeśli  $a \in \widehat{K}$ , to  $|\{f(a) : f \in \text{Gal}(\widehat{K}/K)\}| \leq \text{stopień } a \text{ nad } K$
2.  $a$  jest rozdzielczy nad  $K \iff$  w podpunkcie (1) jest równość.

**Dowód.**

$$\{f(a) : f \in \text{Gal}(\widehat{K}/K)\} \stackrel{??}{=} \{\text{pierwiastki wielomianu minimalnego } w_a \in K[X] \text{ nad } K\}$$

czyli  $\deg(a/K) = \deg(w_a)$ . ☕

Element  $a \in L$  nazywamy **elementem pierwotnym** rozszerzenia  $K \subseteq L$ , gdy  $L = K(a)$ .

**Twierdzenie 6.8.** Niech  $K \subseteq L$  będzie rozszerzeniem skończonym,  $L = K(a_1, \dots, a_n)$  i  $a_1, \dots, a_n$  rozdzielcze nad  $K$ . Wtedy istnieje  $a^* \in L$  rozdzielczy nad  $K$  taki, że  $L = K(a^*)$ .

**Dowód.** Bez starty ogólności założmy, że  $K \subseteq L \subseteq \hat{K}$ . Rozważmy dwa przypadki:

1.  $K$  jest skończone. Wtedy  $L$  także jest skończone, a  $L^*$  jest cykliczna. Niech więc  $a^* \in L^*$  będzie generatorem  $L^*$ . Wtedy  $L = K(a^*)$ .
2.  $K$  jest nieskończone.

Dowód przez indukcję względem  $n$ . Dla  $n = 1$  jest oczywiste. Robimy więc krok indukcyjny  $(n - 1) \implies n$ :

$$K(a_1, \dots, a_{n-1}) = K(b)$$

$$K(a_1, \dots, a_{n-1}, a_n) = K(b, a_n)$$

Niech teraz  $k$  będzie stopniem  $b$  nad  $K$ , a  $m$  - stopniem  $a_n$  nad  $K(b)$ . Z lematu 6.7 wiemy, że istnieją  $f_1, \dots, f_k \in \text{Gal}(\hat{K}/K)$  takie, że  $f_1(b), \dots, f_k(b)$  są parami różne. Niech więc  $f_{1,1}, \dots, f_{1,m} \in G(\hat{K}/K(b))$  takie, że  $f_{1,1}(a), \dots, f_{1,m}(a)$  są parami różne.

Dla  $i = 1, \dots, k, j = 1, \dots, m$  niech  $f_{i,j} = f_i \circ f_{1,j} \in \text{Gal}(\hat{K}/K)$ .

$$\begin{array}{ccccc} K(b)(a) & \xrightarrow{f_{i,j}} & K(b, f_{1,j}(a)) & \xrightarrow{f_i} & K(f_i(b), f_i(f_{1,j}(a))) \\ \subseteq \uparrow & \searrow \subseteq & & \searrow \subseteq & \\ & K(b) & \longrightarrow & K(f_i(b)) & \\ \subseteq \uparrow & & \subseteq \uparrow & & \\ K & & K & & \end{array}$$

Zauważmy, że

$$\langle i, j \rangle \neq \langle i', j' \rangle \implies \langle f_{i,j}(a), f_{i,j}(b) \rangle \neq \langle f_{i',j'}(a), f_{i',j'}(b) \rangle,$$

bo są dwie możliwości:

- $i \neq i'$ , wtedy  $f_{i,j} = f_i(b) \neq f_{i'}(b) = f_{i',j'}(b)$
- $i = i' \wedge j \neq j'$ , wtedy  $f_{i,j}(a) = f_i(f_{1,j}(a)) \neq f_i(f_{1,j'}(a)) = f_{i',j'}(a)$ , bo  $f_{1,j}'(a) \neq f_{1,j'}'(a)$ .

Skoro  $K$  było nieskończone, to istnieje  $c \in K$  takie, że dla  $\langle i, j \rangle \neq \langle i', j' \rangle$  mamy

$$f_{i,j}(b) + f_{i,j}(a) \cdot c \neq f_{i',j'}(b) + f_{i',j'}(a) \cdot c,$$

bo

$$F(x) = \prod_{\langle i,j \rangle \neq \langle i',j' \rangle} [f_{i,j}(b) + f_{i,j}(a)x - (f_{i',j'}(b) + f_{i',j'}(a)x)]$$

i  $c$  po prostu nie jest pierwiastkiem  $F$ .

Postulujemy, że  $K(b, a_n) = K(a^*)$ , gdzie  $a^* = b + a_n c$  jest elementem pierwotnym.

$\supseteq$  jest jasne

$\subseteq f_{i,j}(a^*), 1 \leq i \leq k, 1 \leq j \leq m$  parami różne.

Wiemy, że  $\deg(a^*/K) \geq k \cdot m$ , z drugiej strony

$$k \cdot m \leq [K(a^*) : K] \leq [K(a_n, b) : K] = [K(b) : K][K(a_n, b) : K(b)] = km$$

czyli wszędzie wyżej są równości i mamy  $K(a^*) = K(a_n, b)$ .





## Wniosek 6.9.

1. Jeśli  $L = K(a_1, \dots, a_n)$  i  $a_i$  są rozdzielcze nad  $K$ , to  $L \supseteq K$  też jest rozdzielcze.
2.  $K \subseteq L$  jest rozdzielcze i  $L \subseteq M$  jest rozdzielcze, to  $K \subseteq M$  też jest rozdzielcze.

**Dowód.** 1. Niech  $L = K(a)$  i  $a$  jest rozdzielczy nad  $K$ . Załóżmy, że  $b \in L$  nie jest rozdzielczy nad  $K$ . Wtedy  $L = K(b, a)$ .

$$\begin{array}{ccccc} n \cdot m & & n & & m \\ \parallel & & \parallel & & \parallel \\ \deg(a/K) & = & \deg(b/K) \cdot \deg(a/K(b)) \\ \parallel & & \parallel & & \parallel \\ [K(a) : K] & = & [K(b) : K] \cdot [K(a, b) : K(b)] \end{array}$$

Wyberzmy teraz  $g \in K[X]$  takie, że  $g(a) = b$ . Wtedy

$$n \cdot m = |\{f(a) : f \in \text{Gal}(\widehat{K}/K)\}| = (*),$$

bo  $a$  jest rozdzielczy nad  $K$ . Dalej,

$$(*) = |\{(f(b), f(a)) : f \in \text{Gal}(\widehat{K}/K)\}| = (**),$$

bo  $f(b)$  ma  $k < n$  możliwości, gdyż  $b$  nie jest rozdzielczy nad  $K$  i korzystamy z 6.7. Przy ustalonym  $f(b)$  skakać po  $f(a)$  możemy na co najwyżej  $m$  sposobów, bo  $\deg(a/K(b)) = m = \deg(f(a)/K(f(b)))$ . Czyli koniec końców

$$(**) \leq k \cdot m < n \cdot m,$$

co daje sprzeczność.

2. Podobny dowód zostawiony studentowi do pokiwania głową, że rozumie a w duszy płacz bo co się dzieje?



## Wykład 7: Rozszerzenia radykalne (czysty Bangladesz)

Niech  $K \subseteq L \subseteq \widehat{K}$  jak zwykle. Wtedy

- $a \in L$  jest **czysto nierozdzielczy** nad  $K$ , czyli **radykalny**, gdy wielomian minimalny  $a$  nad  $K$ ,  $w_a(x) \in K[X]$ , ma tylko jeden pierwiastek w  $\widehat{K}$ .
- $K \subseteq L$  jest **rozszerzeniem radykalnym** (czysto nierozdzielczym), gdy dla każdego  $a \in L$   $a$  jest radykalne nad  $K$ .

### Uwaga 7.1.

1. Jeśli  $\text{char}(K) = 0$ , to  $a$  nad  $K$  jest czysto nierozdzielczy  $\iff a \in K$ .
2.  $a$  jest radykalne nad  $K \iff$  dla każdego  $f \in \text{Gal}(\widehat{K}/K)$   $f(a) = a$
3. Jeśli  $\text{char}(K) = p$ , to  $a$  jest radykalne nad  $K \iff$  istnieje  $n \geq 0$   $a^{p^n} \in K$ .

### Dowód.

1.  $w_a(x)$  ma tylko pierwiastki jednokrotne, gdy  $\text{char}(K) = 0$
2. Oczywiście  $\star$
3.  $\Leftarrow$  oczywiście:  $w_a(x) \in K[X]$  dzieli  $x^{p^n} - a^{p^n} = (x - a)^{p^n} \in K[X]$   
 $\implies$  Dowodzimy indukcyjnie po  $n = \deg(a/K)$ . Niech  $w_a(x) = (x - a)^n \in K[X]$  i  $w'_a(x) = n(x - a)^{n-1} \in K[X]$  i  $w'_a \in I(a/K)$  gdy  $n > 1$ , czyli  $w'_a(x) = 0$ , więc  $p|n$ . Niech więc  $n = p \cdot n_1$  i wtedy  $w_a(x) = (x^p - a^p)^{n_1}$  i  $a^p$  jest radykalny nad  $K$ , bo  $\deg(a^p/K) \leq n_1 < n$ . Z założenia indukcyjnego istnieje  $k \geq 0$  takie, że  $(a^p)^{p^k} = a^{p^{k+1}} \in K$  i to jest to, czego szukaliśmy.



Niech  $K \subseteq L$  będzie rozszerzeniem algebraicznym. Definiujemy

1. **rozdzielcze domknięcie**  $K$  w  $L$ :  $\text{sep}_L(K) = \{a \in L : a \text{ radykalne nad } K\}$
2. **radykalne domknięcie** (czysto nierozdzielcze)  $K$  w  $L$ :  $\text{rad}_L(K) = \{a \in L : a \text{ radykalny nad } K\}$

**Wniosek 7.2.**  $K \subseteq \text{sep}_L(K)$  i  $\text{rad}_L(K) \subseteq L \subseteq \widehat{K}$  to ciała takie, że  $\text{sep}_L(K) \cap \text{rad}_L(K) = K$ .

**Dowód.** Fakt, że  $\text{sep}_L(K)$  jest ciałem wynika z 6.9. Natomiast to, że  $\text{rad}_L(K)$  jest ciałem wynika z tego, że

$$\text{rad}_L(K) = L \cap \bigcap_{f \in \text{Gal}(\widehat{K}/K)} \text{Fix}(f) = \{a \in \widehat{K} : f(a) = a\}$$

Dalej, dla  $a \in \text{sep}_L(K) \cap \text{rad}_L(K)$  mamy  $w_a(x) = x - a$  jest wielomianem minimalnym  $a$  nad  $K$ .



✿  $\widehat{K}^s = \text{sep}_{\widehat{K}}(K)$  jest rozdzielczym domknięciem  $K$

✿  $\widehat{K}^r = \text{rad}_{\widehat{K}}(K)$  jest radykalnym domknięciem  $K$ .

### Uwaga 7.3.

1. Gdy  $K \subseteq L \subseteq \widehat{K}$ , to  $\text{sep}_L(K) = \widehat{K}^s \cap L$ ,  $\text{rad}_L(K) = \widehat{K}^r \cap L$
2. Założmy, że  $K \subseteq L \subseteq M \subseteq \widehat{K}$ , wtedy  $K \subseteq L \subseteq M \iff K \subseteq M$   
 $\text{rad} \quad \text{rad} \quad \text{rad}$

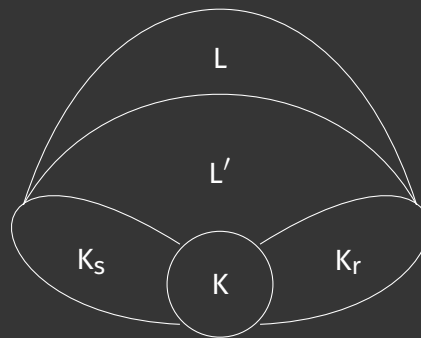
3. Jeśli  $\text{char}(K) = 0$ , to  $\text{sep}_L(K) = K^{\text{alg}}(L)$  i  $\text{rad}_L(K) = K$ , oraz  $\widehat{K}^S = \widehat{K}$ ,  $\widehat{K}^r = K$ .

**Fakt 7.4.** Załóżmy, że  $K \subseteq L \subseteq \widehat{K}$ ,  $K_S = \text{sep}_L(K)$ ,  $K_r = \text{rad}_L(K)$ ,  $L' = K_S \cdot K_r$  i niech  $L' = K_S \cdot K_r$  będzie złożeniem ciał  $K_S$  i  $K_r$  w  $L$  (tzn. ciało generowane w  $L$  przez  $K_S \cup K_r$ :  $L' = K_S(K_r) = K_r(K_S)$ ). Wtedy:

1.  $[L' : K] = [K_S : K] \cdot [K_r : K]$
2. Gdy  $K \subseteq L$  jest rozszerzeniem normalnym, to  $K_S \cdot K_r = L$
3.  $K_S \subseteq L$  jest radykalne, a  $K_r \subseteq L'$  rozdzielcze

**Dowód.** Jeśli  $\text{char}(K) = 0$ , to problem jest trywialny, bo  $K_r = K$ ,  $K_S = L$  i  $L' = L$ .

Założmy więc, że  $\text{char}(K) = p > 0$ .



1.  $L' = K_r(K_S) \supseteq K_r \supseteq K$ , więc:

$$[L' : K] = [K_r(K_S) : K_r][K_r : K]$$

Wystarczy pokazać, że  $[K_S : K] = [K_r(K_S) : K_r]$ .

Zadanie z listy 4: Załóżmy, że  $K \subseteq L, M \subseteq \widehat{K}$  są rozszerzeniami ciała takie, że  $L \cap M = K$ . Jeśli dla wszystkich  $L_0, M_0$  takich, że  $K \subseteq L_0 \subseteq L$  i  $K \subseteq M_0 \subseteq M$  są skończone i  $[L_0(M_0) : L_0] = [M_0 : K]$ , to  $[L(M) : L] = [M : K]$ .

W takim razie wystarczy, że pokażemy

$$[K_r(K_S) : K] = [K_S : K]$$

korzystając z zadania 4 (wyżej). Niech  $K \subseteq K_r^0 \subseteq K_r$  i  $K \subseteq K_S^0 \subseteq K_S$ , pierwsze rozszerzenia są skończone. Na mocy twierdzenia Abela możemy wybrać  $a \in K_S^0$  takie, że  $K_S^0 = K(a)$ . Wtedy również

$$K_r^0(K_S^0) = K_r^0(a)$$

i  $[K_S^0 : K] = \text{stopień } a \text{ nad } K$ ,  $[K_r^0(a) : K_r^0] = \text{stopień } a \text{ nad } K_r^0$ . Wystarczy pokazać, że oba te stopnie się zgadzają.

Niech  $n = [K(a) : K] = \text{stopień } a \text{ nad } K$ . Wtedy

$$1, a, \dots, a^{n-1}$$

to baza liniowa  $K(a)$  nad  $K$ . Przez to, że  $a$  jest rozdzielczy nad  $K$  i  $p = \text{char}(K)$ , to  $K(a) = K(a^p)$  [zad. 7 lista 4], czyli dla każdego  $l > 0$

$$1, a^{p^l}, \dots, a^{(n-1)p^l}$$

też jest bazą  $K(a)$  nad  $K$ .

Pokażemy, że  $1, a, \dots, a^{n-1}$  jest bazą liniową  $K_r^0(a)$  nad  $K_r^0$ :

- liniowa niezależność:

$$\sum k_i a^i = 0, \quad k_i \in K_r^0$$

Niech  $l$  będzie takie, że  $k_i^{p^l} \in K$  dla wszystkich  $i$ , wtedy

$$\sum k_i^{p^l} a^{ip^l} = 0 \implies (\forall i) k_i = 0$$

Czyli  $[K_r^0(a) : K_r^0] \leq [K(a) : K] = n$  i  $1, a, \dots, a^{n-1}$  jest bazą  $K_r^0(a)/K_r^0$ .

2. Bez straty ogólności założmy, że  $[L : K] < \infty$ , bo

$$L = \bigcup \{L_0 : K \subseteq L_0 \subseteq L, L_0/K \text{ skon., norm}\}$$

(a) Niech  $a \in L \supseteq K_r$ , postulujemy, że  $a$  jest rozdzielnicy nad  $K_r$ . Niech  $a = a_1, a_2, \dots, a_n$  będą wszystkimi pierwiastkami wielomianu  $w_a(X) \in K[X]$  i niech

$$v(x) = \prod_{i=1}^n (x - a_i).$$

Wtedy dla  $f \in \text{Gal}(\widehat{K}/K)$  mamy  $f[L] = L$ , więc  $f$  permutuje  $\{a_1, \dots, a_n\}$ . Stąd  $f(v(x)) = v(x)$ , czyli  $f$  zachowuje współczynniki  $v(x)$ . To oznacza, że  $v(x) \in K_r[X]$  i mamy, że  $a$  jest rozdzielnicy nad  $K_r$ .

(b)  $L \supseteq K_s$  jest radykalne: z uwagi 6.6(3) wiemy, że jeśli  $a \in L$  to dla pewnego  $l$  mamy  $a^{p^l}$  jest rozdzielnicy nad  $K$ . Czyli  $a^{p^l} \in K_s$ , więc  $a$  jest radykalny nad  $K_s$ .

Z podpunktów wyżej wiemy, że  $L \subseteq K_r \cdot K_s$  jest rozszerzeniem rozdzielczym i radykalnym, więc  $L = K_r \cdot K_s$ .

3.  $L \supseteq K_s$  jest radykalne w sposób analogiczny do rozumowania wyżej.  $L' \supseteq K_r$  jest rozdzielnicy, bo  $L' = K_r[K_s]$ .



## 7.1 Stopień rozdzielczy, radykalny ciała

$$K \subseteq L \subseteq \widehat{K}$$

Definiujemy  $[L : K]_s = [\text{sep}_L(K) : K]$  jako **stopień rozdzielczy** ciała  $L$  nad  $K$  oraz  $[L : K]_r = [L : \text{sep}_L(K)]$  jako **stopień radykalny**  $L$  nad  $K$ .

Z wyników wyżej dostajemy

$$[L : K] = [L : K]_s \cdot [L : K]_r,$$

bo  $K \subseteq \text{sep}_L(K)$  jest rozdzielnicy, a  $\text{sep}_L(K) \subseteq L$  jest radykalne.

**Uwaga 7.5.**  $K \subseteq L \subseteq \widehat{K}$

1. Jeśli  $K \subseteq L$  jest rozdzielnicy, to  $[L : K] = |\{f \upharpoonright L : f \in \text{Gal}(\widehat{K}/K)\}| = |\{f : L \rightarrow \widehat{K} : f \upharpoonright K = \text{id}\}|$

2. Ogólnie,  $[L : K]_s = |\{f \upharpoonright L : f \in \text{Gal}(\widehat{K}/K)\}|$  (jak wyżej)

**Dowód.** Rozważamy  $[L : K] < \infty$ . Przypadek ogólny  $[L : K]$  można zredukować do przypadku skończonego, co jest ćwiczeniem na liście [wskazówka: rozważyć odpowiednią bazę liniową  $L$  nad  $K$ ]

1. Z twierdzenia Abela  $L = K(a)$  i dla  $f \in \text{Gal}(\widehat{K}/K)$ ,  $f \upharpoonright L$  jest wyznaczone jednoznacznie przez  $f(a)$ . Wiemy, że  $f(a) \in \{\text{pierwiastki } w_a(x)\}$ , których jest  $n = [L : K]$ .

2. DUPA



## Wykład 8: Przekształcenia liniowe

Od teraz  $K \subseteq L$  to będzie skończone rozszerzenie ciała,  $L$  będzie przestrzenią liniową nad  $K$  o wymiarze  $\dim_K L = [L : K]$ . Dla  $a \in L$  będziemy opisywać homomorfizm

$$f_a : L \rightarrow L$$

$$f_a(z) = a \cdot z$$

będący  $K$ -liniowym przekształceniem.

### 8.1 Norma, ślad

→  $N_{L/K}(a) = \det(f_a)$  jest normą homomorfizmu  $f_a$

→  $\text{Tr}_{L/K}(a) = \text{Tr}(f_a)$  jest śladem  $f_a$ .

**Fakt 8.1.** Niech  $\{f_1, \dots, f_r\} = \{f : L \rightarrow \widehat{K} : f|_K = \text{id}\}$ ,  $k = [L : K]_S$  i  $a \in L$ . Wtedy

1.

**Dowód.** 1. DOPISAC

2. Jeśli  $[L : K]_r \neq 1$ , to  $[L : K]_r = p^l$  dla  $l \geq 1$  i  $\text{Tr}(a) = 0$

$$(a) \ a \in K_S, \text{ to } \text{tr}_{L/K}(a) = [L : K_S] \cdot \text{Tr}_{K_S/K}(a) \underset{\text{char}(K)=p}{=} 0$$

$$(b) \ a \notin K_S, \text{ wtedy } w_a(x) \in K[X] \text{ nie jest rozdzielnicy na mocy 6.6(4). Czyli } K[X^p] \ni w_a(x) = x^{tp} + a_{(t-1)p}x^{(t-1)p} + \dots \text{ Stąd } a_{tp-1} = 0 = \text{Tr}_{L/K}(a) = [L : K(a)] \underbrace{\text{Tr}_{K(a)/K}(a)}_{=0}$$

3. Jeśli  $[L : K]_r = 1$ , to  $L = K$  i  $K \subseteq L$  jest rozdzielnicy. Patrzymy na ciąg

$$K \subseteq K(a) \subseteq L$$

mamy

$$\text{Tr}_{L/K}(a) = [L : K(a)] \cdot \text{Tr}_{K(a)/K}(a)$$

Możemy wziąć  $b$  takie, że  $K(a, b) = L$ . Teraz liczymy homomorfizmy  $L \xrightarrow[\widehat{K}]{} \widehat{K}$



### 8.2 Rozszerzenia Galois

$$K \subseteq L \subseteq \widehat{K}$$

→ Mówimy, że rozszerzenie algebraiczne jest **Galois**, gdy dla każdego  $a \in L \setminus K$  istnieje  $f \in \text{Gal}(L/K)$  takie, że  $f(a) \neq a$ .

→ Niech  $G \leq \text{Aut}(L)$ . Wtedy **ciałem punktów stałych** grupy  $G$  nazywamy

$$L^G = \{a \in L : (\forall f \in G) f(a) = a\} = \bigcap_{f \in G} \text{Fix}(f)$$

**Uwaga:** Jeśli  $K \subseteq L$  jest algebraiczne, to  $K \subseteq L$  jest Galois  $\iff K = L^{G(L/K)}$  [ćwiczenia].

**Przykłady:**

1.  $L = K(a)$  i  $a$  jest algebraiczne nad  $K$ .  $w_a$  jest wielomianem minimalnym dla  $a$  i  $a = a_1, \dots, a_k$  są wszystkie pierwiastki  $w_a$  w  $L$ . Wtedy  $G(L/K) \ni F$  jest wyznaczone przez  $f(a) \in \{a_1, \dots, a_k\}$ . Stąd też  $|\text{Gal}(L/K)| \leq k \leq [L : K]$ .

2.  $L = K(a_1, \dots, a_k) \supseteq K$  jest ciałem rozkładu wielomianu  $w(x) \in K[X]$  ( $a_1, \dots, a_k$  to wszystkie pierwiastki w  $L$ ).  $\text{Gal}(L/K) \ni f$  jest wyznaczone przez  $f \upharpoonright \{a_1, \dots, a_n\} \in \text{Sum}(\{a_1, \dots, a_n\})$  i istnieje monomorfizm  $G(L/K) \rightarrow \text{Sum}(\{a_1, \dots, a_n\})$  taki, że  $f \mapsto f \upharpoonright \{a_1, \dots, a_n\}$ .
3.  $\zeta_a \in \mathbb{C}$  jest pierwiastkiem pierwotnym z 1 stopnia  $m$ . Wtedy  $[\mathbb{Q}[\eta_1] : \mathbb{Q}] = \phi(m)$  i  $\eta_1 \in \{\zeta_1, \dots, \zeta_{\phi(m)}\} \subseteq \mathbb{C}$  to wszystkie pierwiastki pierwotne stopnia  $m$  z 1 w  $\mathbb{C}$ . Dowolny  $\text{Gal}(\mathbb{Q}[\zeta_1]/\mathbb{Q}) \ni f$  jest wyznaczony przez  $f(\zeta_1)$  (może być dowolny  $\zeta_i$ ,  $1 \leq i \leq m$ ), bo  $\text{Gal}(\mathbb{Q}[\zeta_1]/\mathbb{Q}) = \mathbb{Q}(\zeta_i)$ . Czyli  $f(\zeta_1) = \zeta_1^{l_f}$  dla pewnego  $0 < l_f < \text{takiego, że } \gcd(m, l_f) = 1$ . Czyli  $\text{Gal}(\mathbb{Q}(\zeta_1)/\mathbb{Q}) \cong \mathbb{Z}_m^k$  takie, że  $f \mapsto l_f$ .

**Twierdzenie 8.2.** Niech  $K \subseteq L$  będzie algebraiczne. Wtedy  $K \subseteq L$  jest Galois  $\iff K \subseteq L$  jest rozdzielcze i normalne.

**Dowód.** Bez starty ogólności niech  $L \subseteq \hat{K}$

$\implies$  Niech  $a \in L \setminus K$  i niech  $a = a_1, \dots, a_n \in L$ , wszystkie parami różne, będą pierwiastkami  $w_a(x) \in K[X]$  w  $L$ . Niech  $v(x) = (x - a_1)(x - a_2) \dots (x - a_n) \in L[X]$ , wtedy  $v(x) | w_a(x)$  i  $v(x)$  jest niezmienniczy względem  $\text{Gal}(L/K)$  [ $f$  permutuje  $a_1, \dots, a_n$ ]. Czyli  $v(x) \in L^{\text{Gal}(L/K)}[X] = K[X]$ , bo  $K \subseteq L$  jest Galois. Stąd  $w_a | v$ , więc  $v = w$  jest rozdzielczy i rozkłada się nad  $L$  na czynniki liniowe. Stąd wynika, że  $K \subseteq L$  jest rozdzielcze i normalne.

$\longleftarrow$

Weźmy  $a \in L \setminus K$  i niech  $w_a(x)$  będzie wielomianem minimalnym [rozdzielczym]. Istnieje  $a' \neq a \in L$  będące innym pierwiastkiem  $w_a$  w  $L$  (bo  $L$  normalne). Istnieje  $f \in \text{Gal}(\hat{K}/K)$  takie, że  $f(a) = a'$ . Ponieważ  $K \subseteq L$  było normalne, to  $f[L] = L$  i mamy  $f \upharpoonright L \in \text{Gal}(L/K)$ ,  $f \upharpoonright L(a) \neq a$ , czyli z uwagi wcześniej  $K \subseteq L$  jest Galois. ☕

**Wniosek 8.3.** Załóżmy, że mamy  $K \subseteq L \subseteq M \subseteq K$ .  $K \subseteq M$  jest rozszerzeniem Galois  $\iff L \subseteq M$  jest Galois.

**Twierdzenie 8.4.** Twierdzenie Artina: niech  $G \leq \text{Aut}(L)$ , wtedy  $L^G \subseteq L$  jest rozszerzeniem Galois i  $[L : L^G] = |G|$ .

**Dowód.** Niech  $G \leq \text{Gal}(L/L^G)$ , wtedy:

- dla każdego  $x \in L \setminus L^G$  istnieje  $f \in \text{Gal}(L/L^G)$  takie, że  $f(x) \neq x$
- $L^G \subseteq L$  jest algebraiczne:

Niech  $a \in L \setminus L^G$ ,  $\{a = a_0, \dots, a_l\} = G(a)$  będzie orbitą  $a$  w  $L$ . Niech  $w(x) = (x - a_0)(x - a_1) \dots (x - a_n) \in L[X]$ . Wtedy dla każdego  $g \in G$  mamy  $g(w(x)) = w(x)$  i  $w \in L^G[X] \implies a$  jest algebraiczny nad  $L^G$ .

Ponieważ  $\deg(w) \leq |G|$ , to  $[L^G(a) : L^G] \leq |G|$ .  $L^G$  jest rozdzielczym rozszerzeniem  $L$ , co razem z twierdzeniem Abela daje nam  $[L : L^G] \leq |G|$  i  $L = L^G(a)$  dla pewnego  $a$ . Czyli  $w_a(x) \in L^G[X]$  jest wielomianem minimalnym  $a$  nad  $L^G$ , więc  $\deg(w_a) \leq |G|$ .

$L^G \subseteq L$  jest rozdzielcze i normalne. Czyli  $|\text{Gal}(L^G/L)| = \deg(w_a) = [L : L^G] \leq |G|$ . Ponieważ  $G \leq \text{Gal}(L/L^G)$ , to  $G = \text{Gal}(L/L^G)$  i  $[L : L^G] = |G|$



**Wniosek 8.5.** Niech  $K \subseteq L$  będzie skończonym rozszerzeniem Galois. Wtedy  $[L : K] = |\text{Gal}(L/K)|$

**Dowód.** Niech  $G = \text{Gal}(L/K)$ , wtedy  $K = L^G$  i  $G$  jest skończona i z twierdzenia Artina  $[L : K] = [L : L^G] = |G|$  ☕

$K \subseteq L \subseteq \hat{K}$ . Definiujemy

$$\mathcal{L} = \{L' : K \subseteq L' \subseteq L\}$$

$$\mathcal{G} = \{H : H \leq \text{Gal}(L/K)\}$$

Od razu pojawiają nam się naturalne homomorfizmy:

$$\Gamma : \mathcal{L} \rightarrow \mathcal{G}$$

$$L' \mapsto \text{Gal}(L/L') \leq \text{Gal}(L/K)$$

$$\Lambda : \mathcal{G} \rightarrow \mathcal{L}$$

$$G \mapsto [K \subseteq] L^G \subseteq L$$

**Twierdzenie 8.6.** Załóżmy, że  $K \subseteq L$  jest skończonym rozszerzeniem Galois. Wtedy  $\Gamma$  jest bijekcją i  $\Lambda = \Gamma^{-1}$ .

**Dowód.**

$$\mathcal{L} \ni L' \xrightarrow{\Gamma} \text{Gal}(L/L') \xrightarrow{\Lambda} L^{\text{Gal}(L/L')} = L',$$

bo  $L' \subseteq L$  jest Galois i używamy 8.3.

Czyli  $\Lambda \circ \Gamma = \text{id}_{\mathcal{L}}$ . Tak samo w drugą stronę:

$$\mathcal{G} \ni H \xrightarrow{\Lambda} L^H \subseteq K \xrightarrow{\Gamma} \text{Gal}(L/L^H) = H$$



**Wniosek 8.9.**  $K \subseteq L$  jest skończone i Galois. Dla  $H \leq \text{Gal}(L/K)$  mamy  $H \triangleleft \text{Gal}(L/K) \iff K \subseteq L^H$  jest normalne.

Ponadto wtedy  $\text{Gal}(L^H/K) \cong \text{Gal}(L/K)/H$

Przed dowodem ćwiczenie, które pojawi się na liście zadań:

Niech  $K \subseteq L' \subseteq L \subseteq \widehat{K}$  takie, że  $K \subseteq L$  jest normalne (może być też skończone). Wtedy  $K \subseteq L'$  jest normalne  $\iff$  dla każdej  $f \in \text{Gal}(L/K)$   $f[L'] = L'$  [ćwiczenia].

**Dowód.** Weźmy sobie  $f \in \text{Gal}(L/K)$  **RYSUNEK**

Struktura 2-sortowa:

$$(L, \text{Gal}(L/K), \star)$$

gdzie  $L$  daje strukturę ciała,  $\text{Gal}(L/K)$  daje strukturę grupy, a  $\star$  jest działaniem  $\text{Gal}(L/K)$  na  $L$ . Wtedy  $f : L \xrightarrow{\cong} L$  indukuje izomorfizm:

$$\begin{aligned} \widehat{f} : \text{Aut}(L) &\xrightarrow{\cong} \text{Aut}(L) \\ \widehat{f}(\phi) &= f \circ \phi \circ f^{-1} \end{aligned}$$

To znaczy  $\widehat{f} = j_f \in \text{Aut}(\text{Aut}(L))$





## Spis twierdzeń

1.1	Fakt . . . . .	4
1.2	Uwaga . . . . .	4
1.3	Uwaga . . . . .	5
1.4	Uwaga . . . . .	6
1.5	Uwaga . . . . .	6
1.6	Twierdzenie . . . . .	7
1.7	Wniosek . . . . .	7
1.8	Fakt . . . . .	7
2.1	Wniosek . . . . .	9
2.2	Wniosek . . . . .	10
2.3	Twierdzenie . . . . .	10
3.1	Uwaga . . . . .	12
3.2	Uwaga . . . . .	12
3.3	Uwaga . . . . .	12
3.4	Twierdzenie . . . . .	13
3.5	Wniosek . . . . .	13
3.6	Twierdzenie . . . . .	14
4.1	Definicja . . . . .	15
4.2	Uwaga . . . . .	15
4.3	Uwaga . . . . .	15
4.4	Definicja: <i>wielomian minimalny, stopień pierwiastka</i> . . . . .	16
4.5	Uwaga: $I(a/K) = (f) \implies \deg(f) = [K(a) : K]$ . . . . .	17
4.6	Fakt: $\dim_K(M) = \dim_L(M) \cdot \dim_K(L)$ . . . . .	17
4.7	Wniosek: $K_{\text{alg}}$ - podciałem . . . . .	18
4.8	Definicja: <i>(relatywne) algebraiczne domknięcie</i> . . . . .	18
5.1	Uwaga: <i>algebraiczne rozszerzenia ciał</i> . . . . .	20
5.2	Uwaga: $(K_{\text{alg}}(L))_{\text{alg}}(L) = K_{\text{alg}}(L)$ . . . . .	20
5.3	Uwaga: $F_m \in \mathbb{Z}[X]$ . . . . .	20
5.4	Uwaga: <i>lemat Gaussa: <math>F_m</math> nierozkładalny w <math>\mathbb{Q}</math></i> . . . . .	21
5.5	Uwaga: <i>pierwiastek pierwotny a <math>\dim_{\mathbb{Q}}(\mathbb{Q}(b))</math></i> . . . . .	22
5.6	Lemat: <i>lemat Liouville'a o aproksymacji diofajtycznej</i> . . . . .	22
5.7	Definicja: <i>algebraiczne domknięcie</i> . . . . .	23
5.8	Uwaga: <i>istnieje algebraiczne domknięcie</i> . . . . .	23
5.9	Twierdzenie: <i>jedyność domknięcia algebraicznego</i> . . . . .	24
5.10	Wniosek: $K \cong L \implies \hat{K} \cong \hat{L}$ . . . . .	24
5.11	Uwaga: <i>algebraiczne rozszerzenie <math>1-1 \rightarrow \hat{K}</math></i> . . . . .	25
6.1	Uwaga: <i>jednorodność <math>\hat{K}</math></i> . . . . .	26
6.2	Uwaga . . . . .	26
6.3	Twierdzenie: <i>rozszerzenie jest normalne</i> . . . . .	27
6.4	Twierdzenie: <i>skończone i normalne <math>\iff</math> ciało rozkładu wielomianu</i> . . . . .	27
6.5	Uwaga . . . . .	28
6.6	Uwaga: <i>nierozkładalny a rozdzielczy</i> . . . . .	28
6.7	Lemat . . . . .	28
6.8	Twierdzenie: <i>Abela o elemencie pierwotnym</i> . . . . .	29
6.9	Wniosek . . . . .	30
7.1	Uwaga . . . . .	31
7.2	Wniosek: <i>przekrój <math>\text{sep}_L</math> i <math>\text{rad}_L</math></i> . . . . .	31
7.3	Uwaga . . . . .	31
7.4	Fakt . . . . .	32
7.5	Uwaga . . . . .	33
8.1	Fakt . . . . .	34
8.2	Twierdzenie . . . . .	35
8.3	Wniosek . . . . .	35
8.4	Twierdzenie: <i>Artin</i> . . . . .	35
8.5	Wniosek . . . . .	35

8.6	Twierdzenie: <i>podstawowe twierdzenie teorii Galois</i> . . . . .	36
8.9	Wniosek . . . . .	36