Aufgabe 1 (Frobeniusautomorphismen). **(4 Punkte)**
Sei K ein lokaler Körper mit endlichem Restklassenkörper und L/K eine endliche Galoiserweiterung. Wir bezeichen mit $L^{\mathrm{nr}}/K^{\mathrm{nr}}$ die Erweiterung der jeweiligen maximalen unverzweigten Erweiterungen, sodass $L^{\mathrm{nr}} = L \cdot K^{\mathrm{nr}}$. Wir betrachten die Menge der *Frobeniusautomorphismen*

$$\mathrm{Frob}(L/K) := \{\tilde{\sigma} \in \mathrm{Gal}(L^{\mathrm{nr}}/K) \mid \exists k \geq 1 \colon \tilde{\sigma}|_{K^{\mathrm{nr}}} = \varphi_K^k\},$$

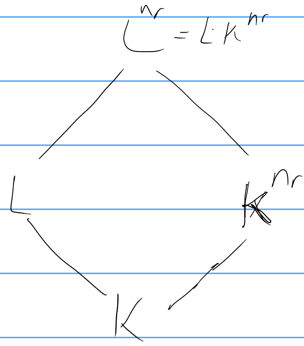
wobei $\varphi_K \in \mathrm{Gal}(K^{\mathrm{nr}}/K) \cong \mathrm{Gal}(\bar{\mathbb{F}}_p/\mathbb{F}_q)$ den Frobeniusmorphismus bezeichne; diese ist offensichtlich abgeschlossen unter Multiplikation. Zeigen Sie, dass für $\tilde{\sigma} \in \mathrm{Frob}(L/K)$ mit Fixkörper $\Sigma := (L^{\mathrm{nr}})^{\langle\tilde{\sigma}\rangle}$ gilt:

(a) $[\Sigma \colon K] < \infty$, (b) $\Sigma^{\mathrm{nr}} = L^{\mathrm{nr}}$, (c) $\tilde{\sigma} = \varphi_\Sigma$.

Insbesondere besteht $\mathrm{Frob}(L/K)$ genau aus den Frobenii endlicher Teilerweiterungen Σ/K von L^{nr}/K mit $\mathrm{Gal}(L^{\mathrm{nr}}/\Sigma) \cong \hat{\mathbb{Z}}$. Zeigen Sie:

(d) Die Einschränkungsabbildung $\mathrm{Frob}(L/K) \longrightarrow \mathrm{Gal}(L/K)$, $\tilde{\sigma} \mapsto \tilde{\sigma}|_L$, ist surjektiv.

a) Sei s/k RKK zu Σ/K.



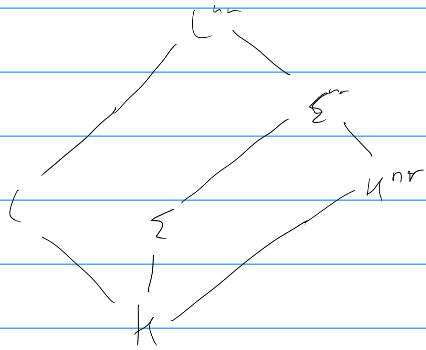
$\tau \in \langle\tilde{\sigma}\rangle \subset \mathrm{Gal}(L^{nr}/K)$
$\Rightarrow \tau|_{K^{nr}} = \varphi_K^{n_\tau \cdot k}$

$(\mathrm{Gal}(K^{nr}/K) : \langle \tilde{\sigma}|_{K^{nr}} \rangle) = (\langle \varphi_K \rangle : \langle \varphi_K^k \rangle) = k$

Es gilt $[L^{nr} : K^{nr}] \leq [L:K]$. (Gleichheit falls $[L:K]$ rein verzweigt)

$[(L^{nr})^{\langle\tilde{\sigma}\rangle} : K] \leq [L^{nr} : K^{nr}] \cdot [(K^{nr})^{\langle \tilde{\sigma}|_{K^{nr}}\rangle} : K] \leq [L:K] \cdot (\langle\varphi_K\rangle : \langle\varphi_K^k\rangle)$
$\leq [L:K] \cdot k < \infty$

b) Fall 1: L/K unverzweigt. Dann $L^{nr} = \Sigma^{nr} = K^{nr}$
Fall 2: L/K verzweigt:
z.z. $L^{nr}/\Sigma = L^{nr}/(L^{nr})^{\langle\tilde{\sigma}\rangle}$ unv.



c)

Aufgabe 2 (Die Neukirchabbildung). **(4 Punkte)**
Sei L/K eine endliche Galoiserweiterung lokaler Körper. Wir definieren die Abbildung

$$\tilde{\Upsilon}_{L/K}\colon \operatorname{Frob}(L/K) \longrightarrow K^\times/\mathrm{N}_{L/K}(L^\times), \quad \tilde{\sigma} \mapsto \mathrm{N}_{\Sigma/K}\pi_\Sigma,$$

wobei π_Σ eine Uniformisierende des Fixkörpers Σ von $\tilde{\sigma}$ bezeichne. Zeigen Sie:

(a) Die Abbildung $\tilde{\Upsilon}_{L/K}$ ist wohldefiniert.

π_Σ wird unter der Operation von $\mathrm{Gal}(\Sigma/K)$ wieder auf eine Uniformisierende gedrückt, da die Galoisgruppe die Bewertung nicht ändert und $\sigma p_\Sigma = p_\Sigma \ \forall \sigma \in \mathrm{Gal}(\Sigma/K)$.
Daher ist $N_{\Sigma/K}\pi_\Sigma = \prod_{\sigma \in \mathrm{Gal}(\Sigma/K)} \sigma(\pi_\Sigma) \neq 0$, also $N_{\Sigma/K}\pi_\Sigma \in K^\times$.

(b) Ist $\tilde{\sigma}|_L = \mathrm{id}_L$, so ist $\tilde{\Upsilon}_{L/K}(\tilde{\sigma}) = 1$.

$\tilde{\sigma}|_L = id|_L \Rightarrow L \subset (L^{nr})^{\langle\tilde{\sigma}\rangle} = \Sigma \Rightarrow L^{nr}/\Sigma/L/K$

$\Rightarrow N_{\Sigma/K} = N_{L/K} \circ N_{\Sigma/L}$ nach Alg 1

$\Rightarrow N_{\Sigma/K}(\pi_\Sigma) \in N_{L/K} L^\times \Rightarrow N_{\Sigma/K}(\pi_\Sigma) = 1 \in K^\times/N_{L/K} L^\times$

Seien nun $\tilde{\sigma}_1, \tilde{\sigma}_2 \in \operatorname{Frob}(L/K)$ und wir setzen $\tilde{\sigma}_3 := \tilde{\sigma}_2\tilde{\sigma}_1$. Für $i \in \{1,2,3\}$ sei Σ_i der Fixkörper von $\tilde{\sigma}_i$ und π_i eine Uniformisierende von. Man kann zeigen, dass $\mathrm{N}_{\Sigma_3/K}(\pi_3) \equiv \mathrm{N}_{\Sigma_1/K}(\pi_1) \cdot \mathrm{N}_{\Sigma_2/K}(\pi_2) \mod \mathrm{N}_{L/K}(L^\times)$. Folgern Sie daraus:

(c) Die Abbildung $\tilde{\Upsilon}_{L/K}$ induziert einen wohldefinierten Gruppenhomomorphismus (*Neukirchabbildung*)

$$\Upsilon_{L/K}\colon \operatorname{Gal}(L/K) \longrightarrow K^\times/\mathrm{N}_{L/K}(L^\times), \quad \sigma \mapsto \tilde{\Upsilon}_{L/K}(\tilde{\sigma}),$$

wobei $\tilde{\sigma} \in \operatorname{Frob}(L/K)$ eine Fortsetzung von σ bezeichne (welche nach Aufgabe 1(d) existiert).

Wohldefiniertheit. Seien $\tilde{\sigma}_1, \tilde{\sigma}_3$ Fortsetzungen von σ.
Dann ist $\tilde{\sigma}_2 = \tilde{\sigma}_3/\tilde{\sigma}_1$ eine Fortsetzung von id.

$\Rightarrow \tilde{\Upsilon}_{L/K}(\tilde{\sigma}_3) = N_{\Sigma_3/K}(\pi_3) = N_{\Sigma_1/K}(\pi_1) \cdot N_{\Sigma_2/K}(\pi_2) = \tilde{\Upsilon}_{L/K}(\tilde{\sigma}_1) \cdot \underbrace{\tilde{\Upsilon}(\tilde{\sigma}_2)}_{=1} = \tilde{\Upsilon}_{L/K}(\tilde{\sigma}_1)$.

Gruppenhom: $\sigma_1, \sigma_2 \in \mathrm{Gal}(L/K)$ mit Fortsetzungen $\tilde{\sigma}_1, \tilde{\sigma}_2$. Dann ist offensichtlich
$\tilde{\sigma}_3 := \tilde{\sigma}_1\tilde{\sigma}_2$ eine Fortsetzung von $\sigma_1\sigma_2$.

$\Rightarrow \Upsilon_{L/K}(\sigma_1\sigma_2) = \tilde{\Upsilon}_{L/K}(\tilde{\sigma}_3) = N_{\Sigma_3/K}(\pi_3) = N_{\Sigma_1/K}(\pi_1) \cdot N_{\Sigma_2/K}(\pi_2)$
$= \tilde{\Upsilon}_{L/K}(\tilde{\sigma}_1) \cdot \tilde{\Upsilon}_{L/K}(\tilde{\sigma}_2) = \Upsilon_{L/K}(\sigma_1) \cdot \Upsilon_{L/K}(\sigma_2)$

✓

Aufgabe 3 (Zerfällungsmodul). **(4 Punkte)**
Seien G eine endliche Gruppe, $\gamma \in \mathrm{H}^2(G,\mathbb{Z})$ ein Erzeuger, wobei wir $\mathbb{Z}$ mit der trivialen G-Wirkung verstanden wissen, und $\mathbb{Z}(\gamma)$ der zugehörige Klassenmodul. Zeigen Sie, dass ein Isomorphismus $\mathbb{Z}(\gamma) \cong \mathbb{Z}[G]$ von G-Moduln existiert.

$$\mathbb{Z}(\gamma) = \mathbb{Z} \oplus \bigoplus_{g \in G\setminus\{1\}} \mathbb{Z} b_g$$

Nach VL haben wir 2 kurze exakte Folgen:

$$0 \longrightarrow \mathbb{Z} \xrightarrow{i} \mathbb{Z}[\gamma] \xrightarrow{\varphi} I_G \longrightarrow 0 \qquad (1)$$

$$0 \longrightarrow I_G \longrightarrow \mathbb{Z}[G] \xrightarrow{\varepsilon} \mathbb{Z} \longrightarrow 0 \qquad (2)$$

z.z.: <u>Beide zerfallen</u>

(1): $\exists p: \mathbb{Z}[\gamma] \longrightarrow \mathbb{Z}$ mit $p \circ i = \mathrm{id}_{\mathbb{Z}}$
$(c, (a_g b_g)_g) \longmapsto c$

Nach Alg II zerfällt daher (1)

(2): $\exists s: \mathbb{Z} \longrightarrow \mathbb{Z}[G]$ mit $s \circ \varepsilon = \mathrm{id}_{\mathbb{Z}}$
$c \longmapsto c \cdot e$

Nach Alg II zerfällt daher (2).

$$\Longrightarrow \mathbb{Z}[\gamma] \cong \mathbb{Z} \oplus I_G \cong \mathbb{Z}[G] \qquad \square$$

Aufgabe 4 (Formeln für das Cup-Produkt). **(4 Punkte)**

Sei G eine Gruppe und sei $A, B \in G$-Mod. Zeigen Sie:

(a) Für $\alpha \in \mathrm{H}^i(G,A)$ und $\beta \in \mathrm{H}^j(G,B)$ ist $\mathrm{res}(\alpha \cup \beta) = \mathrm{res}(\alpha) \cup \mathrm{res}(\beta)$.

Seien $a \in Z^i(G,A)$ bzw. $b \in Z^j(G,B)$ Vertreter von α bzw. β.

Dann lassen sich a und b mithilfe der Standardauflösung als Abbildungen

Seien $a \in Z^i(G,A)$ bzw. $b \in Z^j(G,B)$ Vertreter von α bzw. β.

Dann lassen sich a und b mithilfe der Standardauflösung als Abbildungen

$$a : G^{i+1} \longrightarrow A \; ; \quad b : G^{j+1} \longrightarrow B$$
$$(g_0, \dots, g_i) \longmapsto a(g_0, \dots, g_i) \qquad (g_0, \dots, g_j) \longmapsto b(g_0, \dots, g_j)$$

auffassen.

$$a : G^{i+1} \longrightarrow A \; ; \quad b : G^{j+1} \longrightarrow B$$
$$(g_0, \dots, g_i) \longmapsto a(g_0, \dots, g_i) \qquad (g_0, \dots, g_j) \longmapsto b(g_0, \dots, g_j)$$

auffassen.

Sei H nun eine Untergruppe von G und res_H^G die Restriktion bzgl. und induziert von der Inklusion $i : H \hookrightarrow G$,

$$\mathrm{res}_H^G(a) : H^{i+1} \longrightarrow A \; ; \quad \mathrm{res}_H^G(b) : H^{j+1} \longrightarrow B$$
$$(h_0, \dots, h_i) \longmapsto a(i(h_0), \dots, i(h_i)) \qquad (h_0, \dots, h_j) \longmapsto b(i(h_0), \dots, i(h_j))$$

$$\Rightarrow \mathrm{res}_H^G(a) \cup \mathrm{res}_H^G(b) : H^{i+j+1} \longrightarrow A \otimes B$$
$$(h_0, \dots, h_{i+j}) \longmapsto a(i(h_0), \dots, i(h_i)) \otimes b(i(h_i), \dots, i(h_{i+j})).$$

Wegen
$$\mathrm{res}_H^G(a \cup b) : H^{i+j+1} \longrightarrow A \otimes B$$
$$(h_0, \dots, h_{i+j}) \longmapsto a(i(h_0), \dots, i(h_i)) \otimes b(i(h_i), \dots, i(h_{i+j}))$$

erhalten wir

$$\mathrm{res}_H^G(a) \cup \mathrm{res}_H^G(b) = \mathrm{res}_H^G(a \cup b).$$

Dieses Resultat gilt dann auch auf den Kohomologieklassen.

(b) Für einen Normalteiler N von G und $\alpha \in \mathrm{H}^i(G/H, A^H)$ und $\beta \in \mathrm{H}^j(G/H, B^H)$ ist $\inf(\alpha \cup \beta) = \inf(\alpha) \cup \inf(\beta)$.

Seien $a \in Z^i(G/H, A^H)$ bzw. $b \in Z^j(G/H, B^H)$ Vertreter von α bzw. β.

Dann lassen sich a und b mithilfe der Standardauflösung als Abbildungen

$$a : (G/H)^{i+1} \longrightarrow A^H \; ; \quad b : (G/H)^{j+1} \longrightarrow B^H$$
$$(\bar{g}_0, \dots, \bar{g}_i) \longmapsto a(\bar{g}_0, \dots, \bar{g}_i) \qquad (g_0, \dots, g_j) \longmapsto b(g_0, \dots, g_j)$$

auffassen.

Die Inflation wird induziert von der kanonischen Projektion, $G \twoheadrightarrow G/H$.

$\inf(a): G^{i+1} \longrightarrow A$, $\inf(b): G^{j+1} \longrightarrow B$

$(g_0,\dots,g_i) \longmapsto a(\bar{g}_0,\dots,\bar{g}_i)$ $(g_0,\dots,g_j) \longmapsto b(\bar{g}_0,\dots,\bar{g}_j)$

$\inf(a) \cup \inf(b): G^{i+j+1} \longrightarrow A \otimes B$

$(g_0,\dots,g_{i+j}) \longmapsto a(\bar{g}_0,\dots,\bar{g}_i) \otimes b(\bar{g}_i,\dots,\bar{g}_{i+j})$

$\inf(a \cup b): G^{i+j+1} \longrightarrow A \otimes B$

$(g_0,\dots,g_{i+j}) \longmapsto a(\bar{g}_0,\dots,\bar{g}_i) \otimes b(\bar{g}_i,\dots,\bar{g}_{i+j})$

$\Rightarrow \inf(a) \cup \inf(b) = \inf(a \cup b) \Rightarrow \inf(\alpha) \cup \inf(\beta) = \inf(\alpha \cup \beta)$

(c) Für eine Untergruppe $H \subset G$ von endlichem Index und $\alpha \in \mathrm{H}^i(H,A)$ und $\beta \in \mathrm{H}^j(G,B)$ ist $\mathrm{cor}(\alpha \cup \mathrm{res}(\beta)) = \mathrm{cor}(\alpha) \cup \beta$.

Seien $a \in Z^i(H,A)$ bzw. $b \in Z^j(G,B)$ Vertreter von α bzw. β.
Dann lassen sich a und b durch die Standardauflösung auffassen als Abbildungen

$a: H^{i+1} \longrightarrow A$; $b: G^{j+1} \longrightarrow B$

$(h_0,\dots,h_i) \longmapsto a(h_0,\dots,h_i)$ $(g_0,\dots,g_j) \longmapsto b(g_0,\dots,g_j)$

$\mathrm{cor}\, a: G^{i+1} \longrightarrow A$

$(g_0,\dots,g_i) \longmapsto a(N(g_0),\dots,N(g_i))$

$\mathrm{cor}(a \cup \mathrm{res}\, b): G^{i+j+1} \longrightarrow A \otimes B$

$(g_0,\dots,g_{i+j}) \longmapsto a(N(g_0),\dots,N(g_i)) \otimes b(i(N(g_i)),\dots,i(N(g_{i+j})))$

$\mathrm{cor}(a) \cup b: G^{i+j+1} \longrightarrow A \otimes B$

$(g_0,\dots,g_{i+j}) \longmapsto a(N(g_0),\dots,N(g_i)) \otimes b(g_i,\dots,g_{i+j})$

$$N: A^H \longrightarrow A^G$$

$$a \longmapsto \sum_{s \in G/H} s a$$

$$\begin{tikzcd} A^G \arrow[r, "\mathrm{incl}"] \arrow[rr, bend right, "\cdot (G:H)"'] & A^H \arrow[r, "N"] & A^G \end{tikzcd}$$