

Bachelorarbeit

Explizite Berechnung der Levelt-Turritin-Zerlegung für spezielle D-Moduln

vorgelegt von Maximilian Huber

am Institut für Mathematik
der Universität Augsburg

betreut durch Prof. Dr. Marco Hien

abgegeben am 04.07.2013

stand: 22. April 2013

Inhaltsverzeichnis

| | | |
|----------|---|-----------|
| 0 | Mathematische Grundlagen | 1 |
| 1 | Moduln über \mathcal{D}_k | 5 |
| 1.1 | Weyl-Algebra und der Ring \mathcal{D}_k | 6 |
| 1.1.1 | Alternative Definition / Sichtweise | 8 |
| 1.2 | (Links) \mathcal{D} -Moduln | 9 |
| 1.2.1 | Holonome \mathcal{D} -Moduln | 9 |
| 1.3 | Lokalisierung von $\mathbb{C}\{x\}$ -Moduln | 11 |
| 1.4 | Lokalisierung eines \mathcal{D} -Moduls | 11 |
| 2 | Meromorphe Zusammenhänge | 12 |
| 2.1 | Systeme von ODEs und Meromorphe Zusammenhänge | 12 |
| 2.1.1 | Meromorphe Zusammenhänge | 13 |
| 2.2 | Eigenschaften / Äquivalenz zu holonomen lokalisierten \mathcal{D} -Moduln | 14 |
| 2.3 | Newton Polygon | 18 |
| 2.3.1 | Die Filtrierung ${}^L V \mathcal{D}_{\hat{K}}$ und das L -Symbol | 23 |
| 2.4 | Formale Struktur regulärer Zusammenhänge | 24 |
| 2.5 | pull-back und push-forward | 24 |
| 2.6 | Twisten von \mathcal{D} -Moduln | 33 |
| 2.7 | Fouriertransformation | 34 |
| 3 | Elementare Meromorphe Zusammenhänge | 35 |
| 3.1 | Defnintion von Notizen und [Sab90, Cor 5.2.6] | 39 |
| 3.2 | Defnintion in [Sab90] | 39 |
| 3.3 | Defnintion in [Sab07] | 40 |
| 4 | Levelt-Turrittin-Theorem | 41 |
| 4.1 | Klassische Version | 41 |
| 4.2 | Sabbah's Refined version | 43 |

| | |
|--|-----------|
| 5 DIE Klasse der Fourier-Transformationen | 44 |
| 5.1 Rezept für allgemeine φ | 44 |
| 5.2 Spezialfall $\varphi_1 := \frac{a}{x}$ | 49 |
| 5.2.1 Sabah's refined Levelt-Turrittin-Zerlegung für φ_1 | 55 |
| Anhang | 55 |
| A Aufteilung von $t\varphi'(t)$ | 56 |
| B Genauerer zu $(x^2\partial_x)^k$ | 57 |

Kommentar:

Plan :

- * Grundlagen
- * Moduln über D
- * Meromorphe Zusammenhänge
 - Sind spezielle moduln über D ??
 - * ODE zu Meromorphe Zush
 - * Newton polygon und Steigungen
 - * pullback und pushforward
 - * Fouriertransformation
- * Elementare Meromorphe Zusammenhänge
 - Braucht pullback oder pushforward
- * Levelt Turrittin Theorem
 - Braucht elem, Meromorphe Zush
- * Das Beispiel
 - * Rezept
 - * Anwenden

0 Mathematische Grundlagen

Kommentar: Hier werde ich mich auf [Sab90] und [Cou95] beziehen.

Wir betrachten \mathbb{C} hier als Komplexe Mannigfaltigkeit mit der Klassischen Topologie. In dieser Arbeit spielen die folgenden Funktionenräume eine große Rolle:

- $\mathbb{C}[x] := \{\sum_{i=1}^N a_i x^i \mid N \in \mathbb{N}\}$ die einfachen Potenzreihen
- $\mathbb{C}\{x\} := \{\sum_{i=1}^{\infty} a_i x^i \mid \text{pos. Konvergenzradius}\}$ ([HTT07, Chap 5.1.1])
- $\mathbb{C}[[x]] := \{\sum_{i=1}^{\infty} a_i x^i\}$ die formalen Potenzreihen
- $K := \mathbb{C}(\{x\}) := \mathbb{C}\{x\}[x^{-1}]$ der Ring der Laurent Reihen.
- $\widehat{K} := \mathbb{C}((x)) := \mathbb{C}[[x]][x^{-1}]$ der Ring der formalen Laurent Reihen.
- $\tilde{\mathcal{O}}$ als der Raum der Keime aller (möglicherweise mehrdeutigen) Funktionen. (bei [HTT07] mit \tilde{K} bezeichnet)

Wobei offensichtlich die Inklusionen $\mathbb{C}[x] \subsetneq \mathbb{C}\{x\} \subsetneq \mathbb{C}[[x]]$ und $K \subsetneq \widehat{K}$ gelten.

Kommentar: Es bezeichnet der Hut ($\widehat{}$) das jeweils formale äquivalent zu einem konvergentem Objekt.

Kommentar:

Lemma 0.1 (Seite 2). *ein paar eigenschaften*

1. $\mathbb{C}[x]$ ist ein graduierter Ring, durch die Grad der Polynome. Diese Graduierung induziert eine aufsteigende Filtrierung.

alle Ideale haben die form $(x - a)$ mit $a \in \mathbb{C}$

2. wenn \mathfrak{m} das maximale Ideal von $\mathbb{C}[x]$ (erzeugt von x ist), so ist

$$\mathbb{C}[[x]] = \varprojlim_k \mathbb{C}[X] \setminus \mathfrak{m}^k$$

The ring $\mathbb{C}[[x]]$ ist ein nöterscher lokaler Ring: jede Potenzreihe mit konstantem term $\neq 0$ ist invertierbar.

Der ring ist ebenfalls ein diskreter ??? Ring (discrete valuation ring)

Die Filtrierung nach grad des Maximalen Ideals, genannt \mathfrak{m} -adische Firation, ist die Filtrierung $\mathfrak{m}^k = \{f \in \mathbb{C}[[x]] | v(f) \geq k\}$

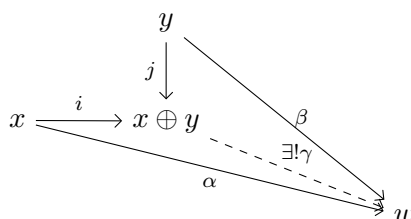
und es gilt $gr_{\mathfrak{m}}(\mathbb{C}[[x]]) = \mathbb{C}[x]$

Für $v = (v_1, \dots, v_n)$ ein Vektor, bezeichnet

$${}^t v := \begin{pmatrix} v_1 \\ \vdots \\ v_n \end{pmatrix}$$

den Transponierten Vektor. Es bezeichnet $M(n \times m, k)$ die Menge der n mal m Dimensionalen Matrizen mit Einträgen in k .

Definition 0.2 (Direkte Summe). [Sta12, 4(Categories).5.1] Seien $x, y \in \text{Ob}(\mathcal{C})$, eine *Direkte Summe* oder das *coprodukt* von x und y ist ein Objekt $x \oplus y \in \text{Ob}(\mathcal{C})$ zusammen mit Morphismen $i \in \text{Mor}_{\mathcal{C}}(x, x \oplus y)$ und $j \in \text{Mor}_{\mathcal{C}}(y, x \oplus y)$ so dass die folgende universelle Eigenschaft gilt: für jedes $w \in \text{Ob}(\mathcal{C})$ mit Morphismen $\alpha \in \text{Mor}_{\mathcal{C}}(x, w)$ und $\beta \in \text{Mor}_{\mathcal{C}}(y, w)$ existiert ein eindeutiges $\gamma \in \text{Mor}_{\mathcal{C}}(x \oplus y, w)$ so dass das Diagramm



kommutiert.

Definition 0.3 (Tensorprodukt). [Sta12, 3(Algebra).11.21]

$$\begin{array}{ccc}
 M \times N & \longrightarrow & M \otimes_R N \\
 & \searrow f & \downarrow \exists! \gamma \\
 & & T
 \end{array}$$

Für eine Abbildung $f : M \rightarrow M'$ definiere das Tensorprodukt davon über R mit N als

$$\begin{aligned}
 \text{id}_N \otimes f : N \otimes_R M &\rightarrow N \otimes_R M' \\
 n \otimes m &\mapsto n \otimes f(m)
 \end{aligned}$$

Bemerkung 0.4. Hier ein paar Rechenregeln für das Tensorprodukt,

$$(M \otimes_R N) \otimes_S L \cong M \otimes_R (N \otimes_S L) \quad (0.1)$$

$$M \otimes_R R \cong M \quad (0.2)$$

Sei $f : M' \rightarrow M$ eine Abbildung, so gilt

$$N \otimes_R (M / \text{im}(f)) \cong N \otimes_R M / \text{im}(\text{id}_R \otimes f) \quad (0.3)$$

Definition 0.5 (Exakte Sequenz). Eine Sequenz

$$\cdots \longrightarrow M_{i-1} \xrightarrow{f_{i-1}} M_i \xrightarrow{f_i} M_{i+1} \longrightarrow \cdots$$

heißt exact, wenn für alle i gilt, dass $\text{im}(f_{i-1}) = \ker f_i$.

Definition 0.6 (Kurze exakte Sequenz). Eine kurze exakte Sequenz ist eine Sequenz

$$0 \longrightarrow M' \xrightarrow{f} M \xrightarrow{g} M'' \longrightarrow 0$$

welche exact ist.

Definition 0.7 (Kokern). Ist $f : M' \rightarrow M$ eine Abbildung, so ist der *Kokern* von f definiert als $\text{coker}(f) = M / \text{im}(f)$.

Proposition 0.8. Ist $f : M' \rightarrow M$ eine injektive Abbildung, so ist

$$\begin{array}{ccccccc}
 0 & \longrightarrow & M' & \xrightarrow{f} & M & \xrightarrow{\pi} & M / f(M') \longrightarrow 0 \\
 & & & & m & \longmapsto & m \bmod f(M')
 \end{array}$$

eine kurze exacte Sequenz und $M/f(M') = \text{coker}(f)$ ist der Kokern von f . ■

Beweis :

Definition 0.9 (Filtrierung). [Sta12, Def 10.13.1.] [Ell10, Rem 2.5.] Eine *aufsteigende Filtrierung* F von einem Objekt (Ring) A ist eine Familie von $(F_i A)_{i \in \mathbb{Z}}$ von Unterobjekten (Unter-ring), so dass

$$0 \subset \cdots \subset F_i \subset F_{i+1} \subset \cdots \subset A$$

und definiere weiter $gr_i^F A := F_i A / F_{i-1} A$ und damit das zu A mit Filtrierung F assoziierte *graduierete Modul*

$$gr^F A := \bigoplus_{k \in \mathbb{Z}} gr_k^F A.$$

Kommentar: gr_i^F als was??

Definition 0.10. [Ayo09] [Sab90, Def 3.2.1] Eine Filtrierung heißt *gut*, falls ...

1 Moduln über \mathcal{D}_k

Ich werde hier die Weyl Algebra, wie in [Sab90, Chapter 1], in einer Veränderlichen einführen. Wir werden als k immer ein Element aus $\{\mathbb{C}[x], \mathbb{C}\{x\}, \mathbb{C}[[x]], K, \widehat{K}\}$ betrachten.

Definition 1.1 (Kommutator). Sei R ein Ring. Für $a, b \in R$ wird

$$[a, b] = a \cdot b - b \cdot a$$

als der *Kommutator von a und b* definiert.

Proposition 1.2. Sei $k \in \{\mathbb{C}[x], \mathbb{C}\{x\}, \mathbb{C}[[x]], K, \widehat{K}\}$. Sei $\partial_x : k \rightarrow k$ der gewohnte Ableitungsoperator nach x , so gilt

1. $[\partial_x, x] = \partial_x x - x \partial_x = 1$

2. für $f \in k$ ist

$$[\partial_x, f] = \frac{\partial f}{\partial x}.$$

3. Es gelten die Formeln

$$[\partial_x, x^k] = kx^{k-1} \tag{1.1}$$

$$[\partial_x^j, x] = j\partial_x^{j-1} \tag{1.2}$$

$$[\partial_x^j, x^k] = \sum_{i \geq 1} \frac{k(k-1) \cdots (k-i+1) \cdot j(j-1) \cdots (j-i+1)}{i!} x^{k-i} \partial_x^{j-i} \tag{1.3}$$

Beweis: 1. Klar.

2. Für ein Testobjekt $g \in k$ ist

$$[\partial_x, f] \cdot g = \partial_x(fg) - f\partial_x g = (\partial_x f)g + \underbrace{f(\partial_x g) - f(\partial_x g)}_{=0} = (\partial_x f)g$$

3. Siehe [AV09, ???] ■

1.1 Weyl-Algebra und der Ring \mathcal{D}_k

Sei dazu $\frac{\partial}{\partial x} = \partial_x$ der Ableitungsoperator nach x und sei $f \in k$. Man hat die folgende Kommutations-Relation zwischen dem *Ableitungsoperator* und dem *Multiplikations Operator* f :

$$\left[\frac{\partial}{\partial x}, f\right] = \frac{\partial f}{\partial x} \quad (1.4)$$

wobei die Rechte Seite die Multiplikation mit $\frac{\partial f}{\partial x}$ darstellt. Dies bedeutet, für alle $g \in \mathbb{C}[x]$ hat man

$$\left[\frac{\partial}{\partial x}, f\right] \cdot g = \frac{\partial f g}{\partial x} - f \frac{\partial g}{\partial x} = \frac{\partial f}{\partial x} \cdot g.$$

Definition 1.3. Definiere nun den Ring \mathcal{D}_k als die Quotientenalgebra der freien Algebra, welche von dem Koeffizientenring in k zusammen mit dem Element ∂_x , erzeugt wird, Modulo der Relation (1.4). Wir schreiben diesen Ring auch als

- $A_1(\mathbb{C}) := \mathbb{C}[x] \langle \partial_x \rangle$ falls $k = \mathbb{C}[x]$, und nennen ihn die *Weyl Algebra*
- $\mathcal{D} := \mathbb{C}\{x\} \langle \partial_x \rangle$ falls $k = \mathbb{C}\{x\}$
- $\widehat{\mathcal{D}} := \mathbb{C}[[x]] \langle \partial_x \rangle$ falls $k = \mathbb{C}[[x]]$
- $\mathcal{D}_K := \mathbb{C}(\{x\}) \langle \partial_x \rangle$ falls $k = K \stackrel{\text{def}}{=} \mathbb{C}\{x\}[x^{-1}]$
- $\mathcal{D}_{\widehat{K}} := \mathbb{C}((x)) \langle \partial_x \rangle$ falls $k = \widehat{K} \stackrel{\text{def}}{=} \mathbb{C}[[x]][x^{-1}]$ ^[1].

Bemerkung 1.4. • Es gilt $\mathcal{D}[x^{-1}] = \mathcal{D}_K$ und $\widehat{\mathcal{D}}[x^{-1}] = \mathcal{D}_{\widehat{K}}$

- Offensichtlich erhält \mathcal{D}_k in kanonischer weiße eine Ringstruktur, dies ist in [AV09, Kapitel 2 Section 1] genauer ausgeführt.
- \mathcal{D}_k ist offensichtlich nichtkommutativ.

Proposition 1.5. [Sab90, Proposition 1.2.3] Jedes Element in \mathcal{D}_k kann auf eindeutige weiße als $P = \sum_{i=0}^n a_i(x) \partial_x^i$, mit $a_i(x) \in k$, geschrieben werden.

Beweis: Siehe [Sab90, Proposition 1.2.3]

Kommentar: ein teil des Beweises ist "left as an exercise" ■

^[1]Wird mit $\widehat{\mathcal{D}}_{\widehat{K}}$ bezeichnet, in [AV09].

Kommentar: Gilt das folgende??

$$\alpha_i(x)\partial_x^i \equiv \frac{\alpha_i}{x^i}(x\partial_x)^i \pmod{F_{i-1}\mathcal{D}}$$

Kommentar: Besser?:

erst Filtrierung definieren und dadurch dann den Grad?

Definition 1.6. Sei $P = \sum_{i=0}^n a_i(x)\partial_x^i$, wie in Proposition 1.5, gegeben, so definiere

$$\deg P := \max\{i | a_i \neq 0\}$$

als den *Grad* (oder den ∂_x -Grad) (oder den ∂_x -Grad) von P .

Kommentar: Unabhängigkeit von Schreibung? Sabbah script!

In natürlicher Weise erhält man die aufsteigende Filtrierung $F_N\mathcal{D} := \{P \in \mathcal{D} | \deg P \leq N\}$ mit

$$\cdots \subset F_{-1}\mathcal{D} \subset F_0\mathcal{D} \subset F_1\mathcal{D} \subset \cdots \subset \mathcal{D}$$

und erhalte $gr_k^F \mathcal{D} \stackrel{\text{def}}{=} F_N\mathcal{D}/F_{N-1}\mathcal{D} = \{P \in \mathcal{D} | \deg P = N\} \cong \mathbb{C}\{x\}$.

Beweis: Sei $P \in F_N\mathcal{D}$ so betrachte den Isomorphismus:

$$F_N\mathcal{D}/F_{N-1}\mathcal{D} \rightarrow \mathbb{C}\{x\}; [P] = P + F_{N-1}\mathcal{D} \mapsto a_n(x)$$

■

Proposition 1.7. Es gilt:

$$gr^F \mathcal{D} := \bigoplus_{N \in \mathbb{Z}} gr_N^F \mathcal{D} = \bigoplus_{N \in \mathbb{N}_0} gr_N^F \mathcal{D} \cong \bigoplus_{N \in \mathbb{N}_0} \mathbb{C}\{x\} \cong \mathbb{C}\{x\}[\xi] = \bigoplus_{N \in \mathbb{N}_0} \mathbb{C}\{x\} \cdot \xi^N$$

\cong
isomorph als grad. Ringe

also $gr^F \mathcal{D} \cong \bigoplus_{N \in \mathbb{N}_0} \mathbb{C}\{x\} \cdot \xi^N$ als graduierte Ringe.

Beweis: TODO

Kommentar: Treffen?

1.1.1 Alternative Definition / Sichtweise

Kommentar: Nur abgeschrieben

[Kas03, Chap 1.1.] Sei X eine 1-Dimensionale komplexe Mannigfaltigkeit und \mathcal{O}_X die Garbe der holomorphen Funktionen auf X . Ein (*holomorpher*) *differenzial Operator* auf X ist ein Garben-Morphismus $P : \mathcal{O}_X \rightarrow \mathcal{O}_X$, lokal in der Koordinate x und mit holomorphen Funktionen $a_n(x)$ als

$$(Pu)(x) = \sum_{n \geq 0} a_n(x) \partial_x^n u(x)$$

geschrieben (für $u \in \mathcal{O}_X$). Zusätzlich nehmen wir an, dass $a_n(x) \equiv 0$ für fast alle $n \in \mathbb{N}$ gilt. Wir setzen $\partial_x^n u(x) = \frac{\partial^n u}{\partial x^n}(x)$. Wir sagen ein Operator hat höchstens Ordnung m , falls $\forall n \geq m : a_n(x) \equiv 0$.

Definition 1.8. Mit \mathcal{D}_X bezeichnen wir die *Garbe von Differentialoperatoren* auf X .

Die Garbe \mathcal{D}_X hat eine Ring Struktur mittels der Komposition als Multiplikation und \mathcal{O}_X ist ein Unterring von \mathcal{D}_X . Sei Θ_X die Garbe der Vektorfelder über X . Es gilt, dass Θ_X in \mathcal{D}_X enthalten ist. Bemerke auch, dass Θ_X ein links \mathcal{O}_X -Untermodule, aber kein rechts \mathcal{O}_X -Untermodule ist.

Proposition 1.9. [Ark12, Exmp 1.1] Sei $X = \mathbb{A}^1 = \mathbb{C}$, $\mathcal{O}_X = \mathbb{C}[t]$ und $\Theta_X = \mathbb{C}[x]\partial_x$. Wobei ∂_x als $\partial_x(x^n) = nx^{n-1}$ wirkt. Dann sind die Differentialoperatoren

$$\mathcal{D}_X = \mathbb{C}[x, \partial_x], \quad \text{mit} \quad \partial_x x - x \partial_x = 1.$$

Somit stimmt die Alternative Definition schon mal mit der Einfachen überein.

Kommentar:

Definition 1.10. [Ark12, Defn 2.1] Sei $X = \mathbb{A}^1$, $\mathcal{O}_X = \mathbb{C}[x]$ und $\mathcal{D}_X = [x, \partial_x]$ mit der Relation $[\partial_x, x] = 1$. Dann definieren wir die links \mathcal{D} -Moduln über \mathbb{A}^1 als die $\mathbb{C}[x, \partial_x]$ -Moduln. Sie werden geschrieben als $\mathcal{D} - \text{mod}(\mathbb{A}^1)$

1.2 (Links) \mathcal{D} -Moduln

Da \mathcal{D} ein nichtkommutativer Ring ist, muss man vorsichtig sein und zwischen links und rechts \mathcal{D} -Moduln unterscheiden. Wenn ich im folgendem von \mathcal{D} -Moduln rede, werde ich mich immer auf links \mathcal{D} -Moduln beziehen.

Beispiel 1.11 (links \mathcal{D} -Moduln). [Ark12, Exmp 2.2]

1. \mathcal{D} ist ein links und rechts \mathcal{D} -Modul
2. $\mathcal{M} = \mathbb{C}[x]$ oder $\mathcal{M} = \mathbb{C}[x, x^{-1}]$ jeweils durch $x \cdot x^m = x^{m+1}$ und $\partial(x^m) = mx^{m-1}$
3. [Ark12, Exmp 2.2] Führe formal, also ohne analytischen Hintergrund, ein Symbol $\exp(\lambda x)$ ein, mit $\partial(f(x) \exp(\lambda x)) = \frac{\partial f}{\partial x} \exp(\lambda x) + f \lambda \exp(\lambda x)$. So ist $\mathcal{M} = \mathcal{O}_X \exp(\lambda x)$ ein \mathcal{D} -Modul.
4. [Gin98, Exmp 3.1.4] Führe formal ein Symbol $\log(x)$ mit den Eigenschaften $\partial_x \log(x) = \frac{1}{x}$ ein. Erhalte nun das \mathcal{D} -Modul $\mathbb{C}[x] \log(x) + \mathbb{C}[x, x^{-1}]$. Dieses Modul ist über \mathcal{D} erzeugt durch $\log(x)$ und man hat

$$\mathbb{C}[x] \log(x) + \mathbb{C}[x, x^{-1}] = \mathcal{D} \cdot \log(x) = \mathcal{D} / \mathcal{D}(\partial_x x \partial_x).$$

Kommentar:

Lemma 1.12. [Sab90, Lem 2.3.3.] Sei \mathcal{M} ein links \mathcal{D} -Modul von endlichem Typ, welches auch von endlichem Typ über $\mathbb{C}\{x\}$ ist. Dann ist \mathcal{M} bereits ein freies $\mathbb{C}\{x\}$ -Modul.

Beweis: Siehe [Sab90, Lem 2.3.3.].

Korollar 1.13. [Sab90, Cor 2.3.4.] Falls \mathcal{M} ein links \mathcal{D} -Modul von endlichem typ, welches außerdem ein endlich dimensionaler Vektorraum ist, so ist schon $\mathcal{M} = \{0\}$.

1.2.1 Holonome \mathcal{D} -Moduln

Kommentar: TODO: defn of Car als Charakteristische Varietät

Definition 1.14. [Sab90, Def 3.3.1.] Sei \mathcal{M} lineares Differentialsystem (linear differential system). Man sagt, \mathcal{M} ist holonom, falls $\mathcal{M} = 0$ oder falls $\text{Car } \mathcal{M} \subset \{x = 0\} \cup \xi = 0$.

Lemma 1.15. [[Sab90](#), Lem 3.3.8.] Ein \mathcal{D} -Modul ist holonom genau dann, wenn $\dim_{gr^F \mathcal{D}, 0} gr^F \mathcal{M} = 1$.

Beweis: Siehe [[Sab90](#), Lem 3.3.8.] ■

Alternative Definition A

Kommentar: Countinho definiert die Charakteristische Varietät erst nach holonom

Definition 1.16 (Holonome \mathcal{D} -Moduln). [[Cou95](#), Chap 10 §1] Ein endlich genertierter \mathcal{D} -Modul \mathcal{M} ist *holonom*, falls $\mathcal{M} = 0$ gilt, oder falls es die Dimension 1 hat.

Bemerkung 1.17. [[Cou95](#), Chap 10 §1] Sei $\mathfrak{a} \neq 0$ ein Links-Ideal von \mathcal{D} . Es gilt nach [[Cou95](#), Corollary 9.3.5], dass $d(\mathcal{D}/\mathfrak{a}) \leq 1$. Falls $\mathfrak{a} \neq \mathcal{D}$, dann gilt nach der *Bernstein's inequality* [[Cou95](#), Chap 9 §4], dass $d(\mathcal{D}/\mathfrak{a}) = 1$. Somit ist \mathcal{D}/\mathfrak{a} ein holonomes \mathcal{D} -Modul.

Bemerkung 1.18. [[Cou95](#), Prop 10.1.1]

- Submoduln und Quotienten von holonomen \mathcal{D} -Moduln sind holonom.
- Endliche Summen von holonomen \mathcal{D} -Moduln sind holonom.

Alternative Definition B

Definition 1.19. Ein lokalisiertes \mathcal{D} -Modul \mathcal{M} heißt *holonom*, falls es ein $\mathfrak{a} \triangleleft \mathcal{D}$ gibt, so dass

$$\mathcal{M} \cong \mathcal{D}/\mathfrak{a}.$$

Bemerkung 1.20. In [[Cou95](#)] wird dies über die Dimension definiert, und bei [[Sab90](#)] über die Charakteristische Varietät.

Kommentar:

1.3 Lokalisierung von $\mathbb{C}\{x\}$ -Moduln

[Sab90, Chap 4.1.] Sei M ein $\mathbb{C}\{x\}$ -Modul. Wir schreiben $M[x^{-1}]$ für den K -Vektor Raum $M \otimes_{\mathbb{C}\{x\}} K$. Im allgemeinen gilt, falls M von endlichem Typ über $\mathbb{C}\{x\}$ ist, so ist $M[x^{-1}]$ von endlichem Typ über K . Bemerke aber, dass $M[x^{-1}]$ generell nicht von endlichem Typ über $\mathbb{C}\{x\}$ ist.

1.4 Lokalisierung eines \mathcal{D} -Moduls

[Sab90, Chap 4.2.] Sei \mathcal{M} ein links \mathcal{D} -Modul. Betrachte \mathcal{M} als $\mathbb{C}\{x\}$ -Modul und definiere darauf

$$\mathcal{M}[x^{-1}] := \mathcal{M} \otimes_{\mathbb{C}\{x\}} K$$

als die Lokalisierung von \mathcal{M} .

Proposition 1.21. [Sab90, Prop 4.2.1.] $\mathcal{M}[x^{-1}]$ erhält in natürlicher Weise eine \mathcal{D} -Modul Struktur.

Beweis: [Sab90, Prop 4.2.1.] mit:

$$\partial_x(m \otimes x^{-k}) = ((\partial_x m) \otimes x^{-k}) - km \otimes x^{-k-1}$$

Kommentar: beweis der \mathcal{D} -linearität ist als übung gelassen

Korollar 1.22. [Sab90, Cor 4.2.8.] Sei \mathcal{M} ein holonomes Modul. Dann ist die lokalisierung von \mathcal{M} isomorph zu $\mathcal{D}/\mathcal{D} \cdot P$ für ein $P \in \mathcal{D} \setminus \{0\}$

Kommentar: Formal??

2 Meromorphe Zusammenhänge

Sei \mathcal{M} ein \mathcal{D} -Modul ungleich Null von endlichem Typ. Falls die links-Multiplikation mit x bijektiv ist, so nennen wir \mathcal{M} einen Meromorphen Zusammenhang. [Sab90, Chap 4]

2.1 Systeme von ODEs und Meromorphe Zusammenhänge

[HTT07, Chap 5.1.1] Für eine Matrix $A(x) = (a_{ij}(x))_{ij} \in M(n \times n, K)$ betrachten wir das System von gewöhnlichen Differentialgleichungen (kurz ODEs)

$$\frac{d}{dx}u(x) = A(x)u(x) \tag{2.1}$$

wobei $u(x) = {}^t(u_1(x), \dots, u_n(x))$ ein Spaltenvektor von unbekannten Funktionen. Wir werden (2.1) immer in einer Umgebung um $x = 0 \in \mathbb{C}$ betrachten. Als Lösungen von (2.1) betrachten wir Keime von holomorphen (aber möglicherweise mehrdeutigen) Funktionen an $x = 0$ (geschrieben als $\tilde{\mathcal{O}}$). Wir sagen $v(x) = {}^t(v_1(x), \dots, v_n(x))$ ist eine Lösung von (2.1), falls $v_i \in \tilde{\mathcal{O}}$ für alle $i \in \{1, \dots, n\}$ und v die Gleichung (2.1), auf einer Umgebung um die 0, erfüllt.

Kommentar: TODO: zeige, dass der Lösungsraum die Eigenschaften von \mathcal{D} -Moduln erfüllt
siehe alternativer Zugang

Alternativer Zugang

Kommentar: Sei P ein linearer Differentialoperator mit Koeffizienten in $a_i(x) \in \mathbb{C}\{x\}$ geschrieben als $P = \sum_{i=0}^d a_i(x) \partial_x^i$. Man sagt eine Funktion $u \in \mathcal{F}$ ist Lösung von P , falls u die Gleichung $Pu = 0$ erfüllt. Man sagt 0 ist ein singulärer Punkt falls $a_d(0) = 0$. Falls 0 kein singulärer Punkt ist, hat P genau d über \mathbb{C} unabhängige Lösungen in $\mathbb{C}\{x\}$.

[Sab90, 3.1.1] Sei \mathcal{F} ein Funktionenraum, auf dem die Differentialoperatoren \mathcal{D} wirken. Ein Element $u \in \mathcal{F}$ ist Lösung von $P \in \mathcal{D}$ falls $P \cdot u = 0$ gilt.

Falls u ein Lösung von P ist, so ist u auch Lösung von $Q \cdot P$ mit $Q \in \mathcal{D}$. Also hängt die Lösung nur vom Links Ideal $\mathcal{D} \cdot P \triangleleft \mathcal{D}$ ab.

2.1.1 Meromorphe Zusammenhänge

Nun wollen wir dieses Klassische Gebilde nun in die moderne Sprache der Meromorphen Zusammenhänge übersetzen.

Definition 2.1 (Meromorpher Zusammenhang). Ein *Meromorpher Zusammenhang* (bei $x = 0$) ist ein Tupplel $(\mathcal{M}_K, \partial)$ und besteht aus folgenden Daten:

- \mathcal{M}_K , ein endlich dimensionaler K -Vektor Raum
- einer \mathbb{C} -linearen Abbildung $\partial : \mathcal{M}_K \rightarrow \mathcal{M}_K$, genannt *Derivation* oder *Zusammenhang*, welche für alle $f \in K$ und $u \in \mathcal{M}_K$ die *Leibnitzregel*

$$\partial(fu) = f'u + f\partial u \quad (2.2)$$

erfüllen soll.

Bemerkung 2.2 (Formaler Meromorpher Zusammenhang). Analog definiert man einen *formalen Meromorphen Zusammenhang* $(\mathcal{M}_{\widehat{K}}, \partial)$ bestehend, analog wie in Definition 2.1, aus folgenden Daten:

- $\mathcal{M}_{\widehat{K}}$, ein endlich dimensionaler \widehat{K} -Vektor Raum
- einer \mathbb{C} -linearen Derivation $\partial : \mathcal{M}_{\widehat{K}} \rightarrow \mathcal{M}_{\widehat{K}}$, welche die *Leibnitzregel* (2.2) erfüllen soll.

Definition 2.3. Seien $(\mathcal{M}_K, \partial_{\mathcal{M}})$ und $(\mathcal{N}_K, \partial_{\mathcal{N}})$ zwei Meromorphe Zusammenhänge. Eine K -lineare Abbildung $\varphi : \mathcal{M} \rightarrow \mathcal{N}$ heißt Morphismus von Meromorphen Zusammenhängen, falls sie $\varphi \circ \partial_{\mathcal{M}} = \varphi \circ \partial_{\mathcal{N}}$ erfüllt. In diesem Fall schreiben wir auch $\varphi : (\mathcal{M}_K, \partial_{\mathcal{M}}) \rightarrow (\mathcal{N}_K, \partial_{\mathcal{N}})$.

Kommentar: TODO: Wann sind die Isomorph $\mathcal{M} \cong \mathcal{N}$ und die Ableitungen kommutieren mit dem Isomorphismus

Definition 2.4. Wir erhalten damit die Kategorie der meromorphen Zusammenhänge über \widehat{K} mit

Objekte: $()$

Bemerkung 2.5. 1. Später wird man auf die Angabe von ∂ verzichten und einfach \mathcal{M}_K als den Meromorphen Zusammenhang bezeichnen, auch wird manchmal auf die Angabe von K verzichtet.

2. [HTT07, Rem 5.1.2.] Die Bedingung (2.2) ist zur schwächeren Bedingung

$$\partial(fu) = f'u + f\partial u,$$

welche für alle $f \in \tilde{\mathcal{O}}$ und für alle $u \in \mathcal{M}_K$ erfüllt sein muss, äquivalent.

Definition 2.6 (Zusammenhangsmatrix). [HTT07, Seite 129] Sei $(\mathcal{M}_K, \partial)$ ein Meromorpher Zusammenhang so wähle eine K -Basis $\{e_i\}_{i \in \{1, \dots, n\}}$ von \mathcal{M} . Dann ist die *Zusammenhangsmatrix bzgl. der Basis $\{e_i\}_{i \in \{1, \dots, n\}}$* die Matrix $A(x) = (a_{ij}(x)) \in M(n \times n, K)$ definiert durch

$$a_{ij}(x) = -{}^t e_i \partial e_j.$$

Also ist, bezüglich der Basis $\{e_i\}_{i \in \{1, \dots, n\}}$, die Wirkung von ∂ auf $u =: {}^t(u_1, \dots, u_n)$ beschrieben durch

$$\partial(u) = \partial\left(\sum_{i=1}^n u_i(x)e_i\right) \overset{\boxed{??}}{\downarrow} \sum_{i=1}^n \left(u'_i(x) - \sum_{j=1}^n a_{ij}u_j(x)\right)e_i.$$

Einfache Umformungen zeigen, dass die Bedingung $\partial u(x) = 0$, für $u(x) \in \sum_{i=1}^n u_i e_i \in \tilde{\mathcal{O}} \otimes_K \mathcal{M}$, äquivalent zu der Gleichung

$$u'(x) = A(x)u(x)$$

für $u(x) = {}^t(u_1(x), \dots, u_n(x)) \in \tilde{\mathcal{O}}^n$. Damit haben wir gesehen, dass jeder Meromorphe Zusammenhang (\mathcal{M}, ∂) ausgestattet mit einer K -Basis $\{e_i\}_{i \in \{1, \dots, n\}}$ von \mathcal{M} zu einem ODE zugeordnet werden kann.

Umgekehrt können wir für jede Matrix $A(x) = (a_{ij}(x))$ den assoziierten Meromorphen Zusammenhang $(\mathcal{M}_A, \partial_A)$ angeben, durch

$$\mathcal{M}_A := \bigoplus_{i=1}^n K e_i, \quad \partial_A e_i := - \sum_{j=1}^n a_{ij}(x) e_j.$$

2.2 Eigenschaften / Äquivalenz zu holonomen lokalisierten \mathcal{D} -Moduln

Kommentar: [Sab90, 4.2] Let \mathcal{M} be a left \mathcal{D} -module. First we consider it only as a $\mathbb{C}\{x\}$ -module and let $\mathcal{M}[x^{-1}]$ be the localized module.

Lemma 2.7 (Lemma vom zyklischen Vektor). [Sab90, Thm 4.3.3] [AV09, Satz 4.8] Sei \mathcal{M}_K ein Meromorpher Zusammenhang. Es Existiert ein Element $m \in \mathcal{M}_K$ und eine ganze Zahl d so dass $m, \partial_x m, \dots, \partial_x^{d-1} m$ eine K -Basis von \mathcal{M}_K ist.

Beweis: [AV09, Satz 4.8] ■

Kommentar: TODO: Wie findet man einen Zyklischen Vektor
 TODO: wie bekommt man daraus das P

Satz 2.8. [Sab90, Thm 4.3.2] Ein Meromorpher Zusammenhang bestimmt ein holonomes lokalisiertes \mathcal{D}_K -Modul und andersherum.

Beweis: [Sab90, Thm 4.3.2] ■

Lemma/Definition 2.9. [AV09, Satz 4.12] [Sab90, Thm 4.3.2] Ist \mathcal{M}_K ein Meromorpher Zusammenhang, dann existiert ein $P \in \mathcal{D}_K$ so dass $\mathcal{M}_K \cong \mathcal{D}_K / \mathcal{D}_K \cdot P$. So ein P heißt dann Minimalpolynom von \mathcal{M}_K .

Beweis: [AV09, Satz 4.12] ■

Kommentar:

Bemerkung 2.10. [Sab90, Proof of Theorem 5.4.7]

$$\dim_{\hat{K}} \mathcal{M}_{\hat{K}} = \deg P \text{ wenn } \mathcal{M}_{\hat{K}} = \mathcal{D} / \mathcal{D} \cdot P$$

Satz 2.11. [AV09, Seite 64] Ist $P = P_1 \cdot P_2$ mit $P_1, P_2 \in \mathcal{D}_K$ so gilt

$$\mathcal{D}_K / \mathcal{D}_K \cdot P \cong \mathcal{D}_K / \mathcal{D}_K \cdot P_1 \oplus \mathcal{D}_K / \mathcal{D}_K \cdot P_2.$$

Beweis: [AV09, Seite 57-64] ■

Korollar 2.12. Sei $P = P_1 \cdot P_2$ mit $P_1, P_2 \in \mathcal{D}_K$ wie in Satz 2.11 so gilt

$$\mathcal{D}_K/\mathcal{D}_K \cdot (P_1 \cdot P_2) \cong \mathcal{D}_K/\mathcal{D}_K \cdot (P_2 \cdot P_1)$$

Beweis :

$$\begin{aligned} \mathcal{D}_K/\mathcal{D}_K \cdot P &= \mathcal{D}_K/\mathcal{D}_K \cdot (P_1 \cdot P_2) \\ &\cong \mathcal{D}_K/\mathcal{D}_K \cdot P_1 \oplus \mathcal{D}_K/\mathcal{D}_K \cdot P_2 \\ &= \mathcal{D}_K/\mathcal{D}_K \cdot P_2 \oplus \mathcal{D}_K/\mathcal{D}_K \cdot P_1 \\ &\cong \mathcal{D}_K/\mathcal{D}_K \cdot (P_2 \cdot P_1) \end{aligned}$$

■

Lemma 2.13. Sei $(\mathcal{M}_K, \partial)$ ein gegebener Meromorpher Zusammenhang, und φ ein Basisisomorphismus von K^r nach \mathcal{M}_K , also in der Situation

$$\begin{array}{ccc} \mathcal{M}_K & \xrightarrow{\partial} & \mathcal{M}_K \\ \uparrow \cong \varphi & & \uparrow \varphi \cong \\ K^r & \xrightarrow{\varphi^{-1} \circ \partial \circ \varphi} & K^r \end{array}$$

gilt: $(K^r, \varphi^{-1} \circ \partial \circ \varphi)$ ist ebenfalls ein Meromorpher Zusammenhang.

Beweis : TODO, (3. Treffen)

■

Kommentar:

Lemma 2.14. Sei $(\mathcal{M}_K, \partial)$ ein gegebener Meromorpher Zusammenhang, und $\varphi : \mathcal{M} \rightarrow \mathcal{N}$ ein Isomorphismus so ist $(\mathcal{N}, \varphi^{-1} \circ \partial \circ \varphi)$ ein zu $(\mathcal{M}_K, \partial)$ isomorpher Zusammenhang.

$$\begin{array}{ccc} \mathcal{M}_K & \xrightarrow{\partial} & \mathcal{M}_K \\ \uparrow \cong \varphi & & \uparrow \varphi \cong \\ \mathcal{N} & \xrightarrow{\varphi^{-1} \circ \partial \circ \varphi} & \mathcal{N} \end{array}$$

Beweis : TODO, (3. Treffen)

■

Lemma 2.15. Sei \mathcal{M}_K ein endlich dimensionaler K -Vektor Raum mit ∂_1 und ∂_2 zwei darauf definierte Derivationen. So gilt, die Differenz zweier Derivationen ist K -linear.

Beweis: Seien ∂_1 und ∂_2 zwei Derivationen auf \mathcal{M}_K . Da ∂_1 und ∂_2 \mathbb{C} -linear, ist $\partial_1 - \partial_2$ \mathbb{C} -linear, also muss nur noch gezeigt werden, dass $(\partial_1 - \partial_2)(fu) = f \cdot (\partial_1 - \partial_2)(u) \forall f \in K$ und $u \in \mathcal{M}_K$ gilt.

$$\begin{aligned}
 (\partial_1 - \partial_2)(fu) &= \partial_1(fu) - \partial_2(fu) \\
 &= f'u + f\partial_1 u - f'u - f\partial_2 u \\
 &= \underbrace{f'u - f'u}_{=0} + f \cdot (\partial_1 u - \partial_2 u) \\
 &= f \cdot (\partial_1 - \partial_2)(u)
 \end{aligned}$$

■

Korollar 2.16. Für (K^r, ∂) ein Meromorpher Zusammenhang existiert ein $A \in M(r \times r, K)$, so dass $\partial = \frac{d}{dx} - A$.

Beweis: Es sei (K^r, ∂) ein Meromorpher Zusammenhang. So ist $\frac{d}{dx} - \partial : K^r \rightarrow K^r$ K -linear, also lässt sich durch eine Matrix $A \in M(r \times r, K)$ darstellen, also ist, wie behauptet, $\partial = \frac{d}{dx} - A$. ■

Proposition 2.17 (Transformationsformel). [[HTT07](#), Chap 5.1.1] In der Situation

$$\begin{array}{ccccc}
 K^r & \xrightarrow{\frac{d}{dz} + A} & & & K^r \\
 & \searrow \varphi & & & \nearrow \varphi \\
 & & M & \xrightarrow{\partial} & M \\
 & \nearrow \psi & & & \searrow \psi \\
 K^r & \xrightarrow{\frac{d}{dz} + B} & & & K^r \\
 \uparrow \cong T & & & & \uparrow \cong T \\
 & & & & \\
 & & & &
 \end{array}$$

mit φ, ψ und T K -Linear und $\partial, (\frac{d}{dx} + A)$ und $(\frac{d}{dx} + B)$ \mathbb{C} -Linear, gilt:

Der Meromorphe Zusammenhang $\frac{d}{dx} + A$ auf K^r wird durch Basiswechsel $T \in GL(r, K)$ zu

$$\frac{d}{dx} + (T^{-1} \cdot T' + T^{-1}AT) = \frac{d}{dx} + B$$

Definition 2.18 (Differenziell Äquivalent). Man nennt A und B differenziell Äquivalent ($A \sim B$) genau dann, wenn es ein $T \in GL(r, K)$ gibt, mit $B = T^{-1} \cdot T' + T^{-1}AT$.

Kommentar: $1 = TT^{-1} \rightsquigarrow T'T^{-1} + T(T^{-1})' = 0$
 $1 = T^{-1}T \rightsquigarrow (T^{-1})'T + T^{-1}T' = 0$

Proposition 2.19. [[Sch](#), Prop 4.1.1] Seien $(\mathcal{M}, \partial_{\mathcal{M}})$ und $(\mathcal{N}, \partial_{\mathcal{N}})$ Meromorphe Zusammenhänge. Durch setzen von

$$\partial(m \otimes n) = \partial_{\mathcal{M}}(m) \otimes n + m \otimes \partial_{\mathcal{N}}(n)$$

als die Wirkung von ∂ auf das K -Modul $\mathcal{M} \otimes_K \mathcal{N}$, wird $(\mathcal{M} \otimes_K \mathcal{N}, \partial)$ zu einem Meromorphen Zusammenhang.

Beweis: Klar ■

Lemma 2.20. [[Sab90](#), Ex 5.3.7] Falls \mathcal{N} regulär und nicht Null, dann ist die Menge der Slopes von $\mathcal{M} \otimes \mathcal{N}$ genau die Menge der Slopes von \mathcal{M} .

Beweis: TODO ■

2.3 Newton Polygon

Kommentar: Quelle: sabbah?
sabbah mach alles formal, barbara mach alles konvergent

Jedes $P \in \mathcal{D}_{\widehat{K}}$, also insbesondere auch jedes $P \in \mathcal{D}_K$, lässt sich eindeutig als

$$P = \sum_{k=0}^n a_k(x) \partial_x^k = \sum_{k=0}^n \left(\sum_{l=-N}^{\infty} \alpha_{kl} x^l \right) \partial_x^k$$

mit $\alpha_{ml} \in \mathbb{C}$ schreiben. Betrachte das zu P dazugehörige

$$\begin{aligned} H(P) &:= \bigcup_{m,l \text{ mit } \alpha_{ml} \neq 0} \left((m, l - m) + \mathbb{R}_{\leq 0} \times \mathbb{R}_{\geq 0} \right) \subset \mathbb{R}^2 \\ &= \bigcup_{m \text{ mit } a_m \neq 0} \left((m, \deg(a_m) - m) + \mathbb{R}_{\leq 0} \times \mathbb{R}_{\geq 0} \right) \subset \mathbb{R}^2. \end{aligned}$$

Definition 2.21. Das Randpolygon der konvexen Hülle $\text{conv}(H(P))$ von $H(P)$ heißt das *Newton Polygon* von P und wird als $N(P)$ geschrieben.

Bemerkung 2.22. Claude Sabbah definiert das Newton-Polygon in [Sab90, 5.1] auf eine andere Weiße. Er schreibt

$$P = \sum_k a_k(x)(x\partial_x)^k$$

mit $a_k(x) \in \mathbb{C}\{x\}$ und definiert das Newton-Polygon als das Randpolygon der konvexe Hülle von

$$H'(P) := \bigcup_{m \text{ mit } a_m \neq 0} \left((m, \deg(a_m)) + \mathbb{R}_{\leq 0} \times \mathbb{R}_{\geq 0} \right) \subset \mathbb{R}^2.$$

Lemma 2.23. [Sab90, Seite 26] Das Newton-Polygon hängt nur von dem assoziierten Meromorphen Zusammenhang ab.

Definition 2.24. Die Menge $\text{slopes}(P)$ sind die nicht-vertikalen Steigungen von $N(P)$, die sich echt rechts von $\{0\} \times \mathbb{R}$ befinden.

- Schreibe $\mathcal{P}(\mathcal{M})$ für die Menge der zu \mathcal{M} gehörigen slopes.
- P heißt *regulär* oder *regulär singular* $:\Leftrightarrow \text{slopes}(P) = \{0\}$ oder $\deg P = 0$, sonst *irregulär singular*.
- Ein meromorpher Zusammenhang $\mathcal{M}_{\widehat{K}}$ (bzw. \mathcal{M}_K) heißt regulär singular, falls es ein regulär singuläres $P \in \mathcal{D}_{\widehat{K}}$ (bzw. $P \in \mathcal{D}_K$) gibt, mit $\mathcal{M}_{\widehat{K}} \cong \mathcal{D}_{\widehat{K}}/\mathcal{D}_{\widehat{K}} \cdot P$ (bzw. $\mathcal{M}_K \cong \mathcal{D}_K/\mathcal{D}_K \cdot P$).

Kommentar:

Definition 2.25 (Alternative Definition). [HTT07, Def 5.1.6] We say a meromorphic connection (\mathcal{M}, ∇) at $x = 0$ is *regular* if there exists a finitely generated \mathcal{O} -submodule $\mathcal{L} \subset \mathcal{M}$ which is stable by the action of $\theta = x\nabla$ (i.e., $\theta\mathcal{L} \subset \mathcal{L}$) and generates \mathcal{M} over K . We call such an \mathcal{O} -submodule \mathcal{L} an \mathcal{O} -lattice of (\mathcal{M}, ∇) .

Beispiel 2.26. 1. Ein besonders einfaches Beispiel ist $P_1 = x^1 \partial_x^2$. Es ist leicht abzulesen, dass

$$m = 2 \qquad l = 1$$

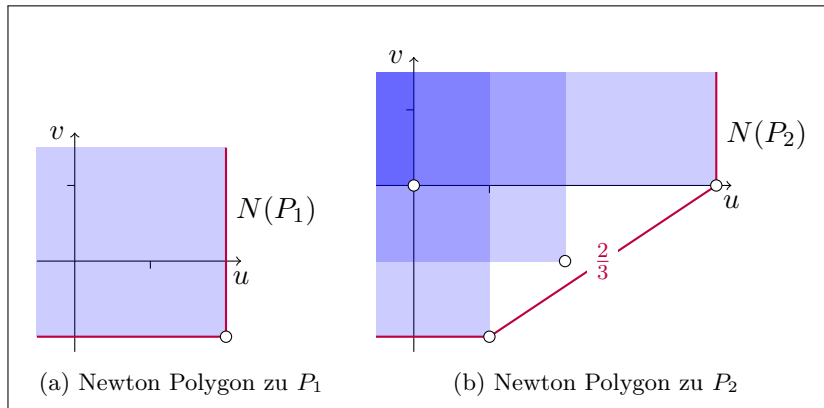
so dass

$$H(P_1) = \left((2, 1 - 2) + \mathbb{R}_{\leq 0} \times \mathbb{R}_{\geq 0} \right) = \{(u, v) \in \mathbb{R}^2 | u \leq 2, v \geq -1\}.$$

In Abbildung 2.2b ist $H(P_1)$ (blau) sowie das Newton Polygon eingezeichnet. Offensichtlich ist $\text{slopes}(P_1) = \{0\}$ und damit ist P_1 regulär singulär.

2. [AV09, Bsp 5.3. 2.] Sei $P_2 = x^4(x+1)\partial_x^4 + x\partial_x^2 + \frac{1}{x}\partial_x + 1$ so kann man das entsprechende Newton Polygon konstruieren. Das Newton Polygon wurde in Abbildung ?? visualisiert. Man erkennt, dass $\mathcal{P}(P_2) = \{0, \frac{2}{3}\}$ ist.

Abbildung 2.1: Zu Beispiel 2.26



Bemerkung 2.27. [AV09, Bem 5.4] Für alle $f \in \mathbb{C}(\{x\}) \setminus \{0\}$ gilt allgemein, dass das zu $P \in \mathcal{D}_{\widehat{K}}$ gehörige Newton Polygon, bis auf vertikale Verschiebung mit dem von $f \cdot P$ übereinstimmt.

Beweis: TODO ■

Damit lässt sich das Newton Polygon, durch ein f , immer so verschieben, dass $(0,0) \in N(f \cdot P)$, und es gilt, dass

$$\mathcal{D}_K \cdot P = \mathcal{D}_K \cdot (f \cdot P) \triangleleft \mathcal{D}_K$$

ist. Dies stellt eine Normierung des Newton Polygons dar.

Lemma 2.28. [Sab90, 5.1]

1. $\mathcal{P}(\mathcal{M}_K)$ ist nicht Leer, wenn $\mathcal{M}_K \neq \{0\}$
2. Wenn man eine exacte Sequenz $0 \rightarrow \mathcal{M}'_K \rightarrow \mathcal{M}_K \rightarrow \mathcal{M}''_K \rightarrow 0$ hat, so gilt $\mathcal{P}(\mathcal{M}_K) = \mathcal{P}(\mathcal{M}'_K) \cup \mathcal{P}(\mathcal{M}''_K)$.

Kommentar: Siehe auch [Sab90, Thm 5.3.4]

Dort Steht:

Wir erhalten die Exakte Sequenz

$$0 \rightarrow \mathcal{D}_{\widehat{K}}/\mathcal{D}_{\widehat{K}} \cdot P_1 \rightarrow \mathcal{D}_{\widehat{K}}/\mathcal{D}_{\widehat{K}} \cdot P \rightarrow \mathcal{D}_{\widehat{K}}/\mathcal{D}_{\widehat{K}} \cdot P_2 \rightarrow 0$$

Korollar 2.29. [Sab90, Thm 5.3.4] $\mathcal{P}(P) = \mathcal{P}(P_1) \cup \mathcal{P}(P_2)$ und $\mathcal{P}(P_1) \cap \mathcal{P}(P_2) = \emptyset$

Satz 2.30. [Sab90, Thm 5.3.1] [AV09, 5.15] Sei $\mathcal{M}_{\widehat{K}}$ ein formaler Meromorpher Zusammenhang und sei $\mathcal{P}(\mathcal{M}_{\widehat{K}}) = \{\Lambda_1, \dots, \Lambda_r\}$ die Menge seiner slopes. Es existiert eine (bis auf Permutation) eindeutige Zerlegung

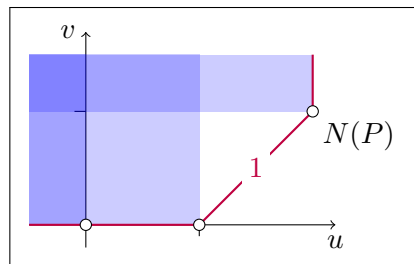
$$\mathcal{M}_{\widehat{K}} = \bigoplus_{i=1}^r \mathcal{M}_{\widehat{K}}^{(i)}$$

in formale Meromorphe Zusammenhänge mit $\mathcal{P}(\mathcal{M}_{\widehat{K}}^{(i)}) = \{\Lambda_i\}$.

Beweis: [Sab90, Thm 5.3.1] oder [AV09, 5.15] ■

Beispiel 2.31. [Sab90, Ex 5.3.6] Sei $P = x(x\partial_x)^2 + x\partial_x + \frac{1}{2}$. So sieht das Newton-Polygon wie folgt aus

Abbildung 2.2: Newton Polygon zu P



mit den Slopes $\mathcal{P}(P) = \{0, 1\} =: \{\Lambda_1, \Lambda_2\}$. Nach dem Satz 2.30 existiert eine Zerlegung $P = P_1 \cdot P_2$ mit $\mathcal{P}(P_1) = \{\Lambda_1\}$ und $\mathcal{P}(P_2) = \{\Lambda_2\}$. Durch scharfes hinsehen erkennt man, dass

$$\begin{aligned} P &= x(x\partial_x)^2 + x\partial_x + \frac{1}{2} \\ &\dots \\ &= (x(x\partial_x) + \dots) \cdot (x\partial_x + \dots) \end{aligned}$$

...

$$= P_1 \cdot P_2$$

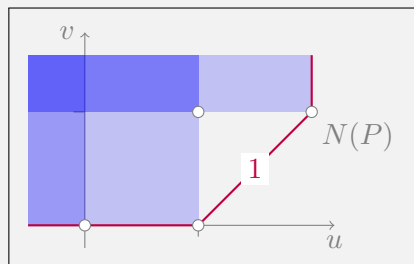
Kommentar:

anders geschrieben

$$\begin{aligned} P &= x(x\partial_x)^2 + x\partial_x + \frac{1}{2} \\ &= xx\partial_x x\partial_x + x\partial_x + \frac{1}{2} \\ &= x^2(x\partial_x + 1)\partial_x + x\partial_x + \frac{1}{2} \\ &= x^3\partial_x^2 + x^2\partial_x + x\partial_x + \frac{1}{2} \\ &= x^3\partial_x^2 + (x^2 + x)\partial_x + \frac{1}{2} \end{aligned}$$

So sieht das Newton-Polygon wie folgt aus

Abbildung 2.3: Newton Polygon zu P



Korollar 2.32. [Sab90, Cor 5.2.6] Falls $\mathcal{M}_{\widehat{K}}$ ein regulärer formaler Meromorpher Zusammenhang ist, dann ist $\mathcal{M}_{\widehat{K}}$ isomorph zu einer direkten Summe von elementaren formalen Zusammenhängen. Wobei die elementaren formalen Zusammenhänge die sind, die zu passendem $\mathcal{D}_{\widehat{K}}/\mathcal{D}_{\widehat{K}} \cdot (x\partial_x - \alpha)^p$ isomorph sind.

2.3.1 Die Filtrierung ${}^L V \mathcal{D}_{\widehat{K}}$ und das L -Symbol

Sei $\Lambda = \frac{\lambda_0}{\lambda_1} \in \mathbb{Q}_{\geq 0}$ vollständig gekürzt, also mit λ_0 und λ_1 in \mathbb{N} relativ prim. Definiere die Linearform $L(s_0, s_1) = \lambda_0 s_0 + \lambda_1 s_1$ in zwei Variablen, Sei $P \in \mathcal{D}_{\widehat{K}}$. Falls $P = x^a \partial_x^b$ mit $a \in \mathbb{Z}$ und $b \in \mathbb{N}$ setzen wir

$$\text{ord}_L(P) = L(b, b - a)$$

und falls $P = \sum_{i=0}^d b_i(x) \partial_x^i$ mit $b_i \in \widehat{K}$ setzen wir

$$\text{ord}_L(P) = \max_{\{i | a_i \neq 0\}} L(i, i - v(b_i)).$$

Definition 2.33 (Die Filtrierung ${}^L V \mathcal{D}_{\widehat{K}}$). [Sab90, Seite 25] Nun können wir die aufsteigende Filtration ${}^L V \mathcal{D}_{\widehat{K}}$, welche mit \mathbb{Z} indiziert ist, durch

$${}^L V_{\lambda} \mathcal{D}_{\widehat{K}} := \{P \in \mathcal{D}_{\widehat{K}} \mid \text{ord}_L(P) \leq \lambda\}$$

definieren.

Bemerkung 2.34. Man hat $\text{ord}_L(PQ) = \text{ord}_L(P) + \text{ord}_L(Q)$ und falls $\lambda_0 \neq 0$ hat man auch, dass $\text{ord}_L([P, Q]) \leq \text{ord}_L(P) + \text{ord}_L(Q) - 1$.

Definition 2.35 (L -Symbol). [Sab90, Seite 25] Falls $\lambda_0 \neq 0$ ist der graduierte Ring $gr {}^L V \mathcal{D}_{\widehat{K}} \stackrel{\text{def}}{=} \bigoplus_{\lambda \in \mathbb{Z}} gr_{\lambda} {}^L V \mathcal{D}_{\widehat{K}}$ ein kommutativer Ring. Bezeichne die Klasse von ∂_x in dem Ring durch ξ , dann ist der Ring isomorph zu $\widehat{K}[\xi]$. Sei $P \in \mathcal{D}_{\widehat{K}}$, so ist $\sigma_L(P)$ definiert als die Klasse von P in $gr_{\text{ord}_L(P)} {}^L V \mathcal{D}_{\widehat{K}}$. σ_L wir hierbei als das L -Symbol bezeichnet.

Zum Beispiel ist $\sigma_L(x^a \partial_x^b) = x^a \xi^b$.

Bemerkung 2.36. Ist $P \in \mathcal{D}_{\widehat{K}}$ geschrieben als $P = \sum_i \sum_j \alpha_{ij} x^j \partial_x^i$. So erhält man $\sigma_L(P)$ durch die Setzung

$$\sigma_L(P) = \sum_{\{(i,j) \mid L(i, i-j) = \text{ord}_L(P)\}} \alpha_{ij} x^j \xi^i.$$

Beweis :

Kommentar: Ich will die Linearform vermeiden und direkt die skalare Steigung verwenden

Definition 2.37 (Stützfunktion). Die Funktion

$$\omega_P : [0, \infty) \rightarrow \mathbb{R}, \omega_P(t) := \inf\{v - tu \mid (u, v) \in N(P)\}$$

heißt Stützfunktion und wird in [AV09] als alternative zu dieser Ordnung verwendet.

Bemerkung 2.38. Wenn $L(x_0, s_1)$ wie oben aus Λ entstanden ist, so gilt

$$\omega_P(\Lambda) = \text{ord}_L(P).$$

Kommentar: TODO: ist L Slope (gehört zu Slope) dann hat $\sigma_L(P)$ zumindest 2 Monome

2.4 Formale Struktur regulärer Zusammenhänge

[Sab90, Chap 5.2] Sei $\mathcal{M}_{\widehat{K}}$ ein regulärer formaler Meromorpher Zusammenhang.

Lemma 2.39. [Sab90, Lem 5.2.1.] *Es existiert eine Basis von $\mathcal{M}_{\widehat{K}}$ über \widehat{K} mit der Eigenschaft, dass die Matrix, die $x\partial_x$ beschreibt, nur Einträge in $\mathbb{C}[[x]]$ hat.*

Beweis: Wähle einen zyklischen Vektor $m \in \mathcal{M}_{\widehat{K}}$ und betrachte die Basis $m, \partial_x m, \dots, \partial_x^{d-1} m$ (siehe Lemma 2.7). Schreibe $\partial_x^d m = \sum_{i=0}^{d-1} (-b_i(x)) \partial_x^i m$ in Basisdarstellung mit Koeffizienten $b_i \in \widehat{K}$. Also erfüllt m die Gleichung $\partial_x^d m + \sum_{i=0}^{d-1} b_i(x) \partial_x^i m = 0$.

Kommentar: bis hier schon klar

Tatsächlich werden wir $b_i(x) = x^i b'_i(x)$ mit $b'_i \in \mathbb{C}[[x]]$ schreiben (wegen Regularität).

Dies impliziert, dass $m, x\partial_x m, \dots, (x\partial_x)^{d-1} m$ ebenfalls eine Basis von $\mathcal{M}_{\widehat{K}}$ ist.

Die Matrix von $x\partial_x$ zu dieser neuen Basis hat nur Einträge in $\mathbb{C}[[x]]$. ■

Lemma 2.40. [Sab90, Lem 5.2.2.] *Es existiert sogar eine Basis von $\mathcal{M}_{\widehat{K}}$ über \widehat{K} so dass die Matrix zu $x\partial_x$ konstant ist.*

Beweis: TODO ■

2.5 pull-back und push-forward

Kommentar: TODO: Variable zu x machen

Nach [Sab07, 1.a] und [HTT07, 1.3]. Sei

$$\rho : \mathbb{C} \rightarrow \mathbb{C}, t \mapsto x := \rho(t) \in t\mathbb{C}[[t]]$$

mit Bewertung $p \geq 1$.

Kommentar: TODO: muss das ein Homomorphismus sein? [Cou95, Seite 130]

Hier werden wir immer $\rho(t) = t^p$ für ein $p \in \mathbb{N}$ betrachten. Diese Funktion induziert eine Abbildung

$$\rho^* : \mathbb{C}\{x\} \hookrightarrow \mathbb{C}\{t\}, f \mapsto f \circ \rho \quad \text{bzw.} \quad \rho^* : \mathbb{C}[[x]] \hookrightarrow \mathbb{C}[[t]], f \mapsto f \circ \rho$$

analog erhalten wir

$$\rho^* : K \hookrightarrow L := \mathbb{C}(\{t\}), f \mapsto f \circ \rho \quad \text{bzw.} \quad \rho^* : \widehat{K} \hookrightarrow \widehat{L} := \mathbb{C}((t)), f \mapsto f \circ \rho$$

wobei L (bzw. \widehat{L}) eine endliche Körpererweiterung von K (bzw. \widehat{K}) ist.

Kommentar: TODO: damit wird \widehat{L} zu einem \widehat{K} Vektorraum.

Sei $\mathcal{M}_{\widehat{K}}$ ein endlich dimensionaler $\mathbb{C}((t))$ Vektorraum ausgestattet mit einem Zusammenhang ∇ .

Definition 2.41 (pull-back). [Sab07, 1.a] und [Sab90, Page 34] Der *pull-back* oder das *Inverses Bild* $\rho^*\mathcal{M}_{\widehat{K}}$ von $(\mathcal{M}_{\widehat{K}}, \nabla)$ ist der Vektorraum

$$\rho^*\mathcal{M}_{\widehat{K}} := \widehat{L} \otimes_{\widehat{K}} \mathcal{M}_{\widehat{K}} \stackrel{\text{def}}{=} \mathbb{C}((t)) \otimes_{\mathbb{C}((x))} \mathcal{M}_{\mathbb{C}((x))}$$

mit dem *pull-back Zusammenhang* $\rho^*\nabla$ definiert durch

$$\partial_t(1 \otimes m) := \rho'(t) \otimes \partial_x m. \quad (2.3)$$

Für ein allgemeines $\varphi \otimes m \in \rho^*\mathcal{M}_{\widehat{K}}$ gilt somit

$$\partial_t(\varphi \otimes m) := \rho'(t)(\varphi \otimes \partial_x m) + \frac{\partial \varphi}{\partial t} \otimes m. \quad (2.4)$$

Lemma 2.42. In der Situation von Lemma 2.41, mit $\mathcal{M}_{\widehat{K}} = \mathcal{D}_{\widehat{K}}/\mathcal{D}_{\widehat{K}} \cdot P(x, \partial_x)$ für ein $P(x, \partial_x) \in \mathcal{D}_{\widehat{K}}$, gilt

$$\rho^*\mathcal{M}_{\widehat{K}} \cong \mathcal{D}_{\widehat{L}}/\mathcal{D}_{\widehat{L}} \cdot P(\rho(t), \rho'(t)^{-1}\partial_t).$$

Kommentar: also wird der Übergang beschrieben durch

$$\begin{aligned} x &\rightarrow \rho(t) \\ \partial_x &\rightarrow \rho'(t)^{-1} \partial_t \end{aligned}$$

Kommentar: [Cou95, Seite 130] Holonomic modules are preserved under this construction.

Kommentar: [Sab90, Page 34] Sei $\mathcal{M}_{\widehat{K}}$ ein formaler Meromorpher Zusammenhang. Man definiert $\pi^* \mathcal{M}_{\widehat{K}}$ als den Vektor Raum über $\widehat{L} : \pi^* \mathcal{M}_{\widehat{K}} = \widehat{L} \otimes_{\widehat{K}} \mathcal{M}_{\widehat{K}}$. Dann definiert man die Wirkung von ∂_t durch: $t\partial_t \cdot (1 \otimes m) = q(1 \otimes (x\partial_x \otimes m))$ und damit

$$t\partial_t \cdot (\varphi \otimes m) = q(\varphi \otimes (x\partial_x \cdot m)) + ((t\frac{\partial\varphi}{\partial t}) \otimes m).$$

Man erhält damit die Wirkung von $\partial_t = t^{-1}(t\partial_t)$.

Für den Beweis von Lemma 2.42 werden zunächst zwei kleine Lemmata bewiesen.

Lemma 2.43. Es gilt $\rho^* \mathcal{D}_{\widehat{K}} = \widehat{L} \otimes_{\widehat{K}} \mathcal{D}_{\widehat{K}} \cong \mathcal{D}_{\widehat{L}}$ mittels

$$\begin{aligned} \Phi : \widehat{L} \otimes_{\widehat{K}} \mathcal{D}_{\widehat{K}} &\xrightarrow{\cong} \mathcal{D}_{\widehat{L}} \\ f(t) \otimes m(x, \partial_x) &\longmapsto f(t)m(\rho(t), \rho'(t)^{-1} \partial_t) \end{aligned}$$

■

Beweis:

Kommentar:

Bemerkung 2.44. BENÜTZT BEREITS DAS NÄCHSTE LEMMA...

Das soeben, in Lemma 2.43, definierte Φ erfüllt für Elementartensoren $1 \otimes m \in \widehat{L} \otimes_{\widehat{K}} \mathcal{D}_{\widehat{K}}$

$$\begin{aligned} \partial_u(1 \otimes m) &\stackrel{\text{def}}{=} \rho'(t) \otimes \partial_x m \\ &\stackrel{\Phi}{\mapsto} \underbrace{\rho'(t)\rho'(t)^{-1}}_{=1} \partial_t m(\rho(t), \rho'(t)^{-1} \partial_t) \\ &= \partial_t m(\rho(t), \rho'(t)^{-1} \partial_t) \end{aligned}$$

und somit (2.3) wie gewollt.

Lemma 2.45. Sei $P(x, \partial_x) \in \mathcal{D}_K$. In der Situation

$$\begin{array}{ccc} \widehat{L} \otimes_{\widehat{K}} \mathcal{D}_{\widehat{K}} & \xrightarrow{\text{id} \otimes _ \cdot P(t, \partial_t)} & \widehat{L} \otimes_{\widehat{K}} \mathcal{D}_{\widehat{K}} \\ \downarrow \cong \Phi & & \downarrow \cong \Phi \\ \mathcal{D}_{\widehat{L}} & \xrightarrow{\alpha} & \mathcal{D}_{\widehat{L}} \end{array}$$

mit Φ wie in Lemma 2.43 macht $\alpha := _ \cdot P(\rho(t), \rho'(t)^{-1} \partial_t)$ das Diagramm kommutativ. ■

Beweis :

Bemerkung 2.46. Wie sieht die Wirkung auf dem pull-back Zusammenhang so aus?

Betrachte ein Element der Form $f(t)m = f(\rho(u))m$.

Kommentar: TODO: Umformulieren als Vermutung, oder ähnliches

$$\begin{aligned} \partial_t(f(t)m) &= \partial_{\rho(u)}(f(\rho(u))m) \\ &= f'(\rho(u)) \cdot \underbrace{\frac{\partial(f(u))}{\partial(f(u))}}_{=1} m + f(\rho(u)) \underbrace{\partial_{\rho(u)}}_{=\partial_t} m = (\star) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \rho'(u)^{-1} \partial_u(f(t)m) &= \frac{1}{p u^{p-1}} \partial_u(f(u^p)m) \\ &= f'(u^p)m + f(u^p) \frac{1}{p u^{p-1}} \partial_u m = (\star) \end{aligned}$$

Also gilt $\partial_t(f(t)m) = \rho'(u)^{-1} \partial_u(f(t)m)$ und somit ist die Wirkung von ∂_t gleich der Wirkung von $\rho'(u)^{-1} \partial_u$.

Beweis : von Lemma 2.42. Sei $P \in \mathcal{D}_{\widehat{K}}$ und $\mathcal{M}_{\widehat{K}} := \mathcal{D}_{\widehat{K}} / \mathcal{D}_{\widehat{K}} \cdot P$. Wir wollen zeigen, dass

$$\rho^* \mathcal{M}_{\widehat{K}} \stackrel{!}{\cong} \mathcal{D}_{\widehat{L}} / \mathcal{D}_{\widehat{L}} \cdot Q$$

für $Q = P(\rho(t), \rho'(t)^{-1} \partial_t)$ gilt. Betrachte dazu die kurze Sequenz

$$\begin{array}{ccccccc} 0 & \longrightarrow & \mathcal{D}_{\widehat{K}} & \xrightarrow{_ \cdot P} & \mathcal{D}_{\widehat{K}} & \xrightarrow{\pi_{\widehat{K}}} & \mathcal{M}_{\widehat{K}} \longrightarrow 0 \\ & & u \longmapsto & u \cdot P & & & \\ & & & & u \longmapsto & u \bmod \mathcal{D}_{\widehat{K}} \cdot P & \end{array}$$

ist **exact**, weil $\mathcal{M}_{\widehat{K}} \cong \mathcal{D}_{\widehat{K}} / \mathcal{D}_{\widehat{K}} \cdot P = \text{coker}(_ \cdot P)$. Weil \widehat{K} **flach** ist, da K Körper, ist auch, nach anwenden des Funktors $\widehat{L} \otimes_{\widehat{K}} _$, die Sequenz

$$0 \longrightarrow \widehat{L} \otimes_{\widehat{K}} \mathcal{D}_{\widehat{K}} \xrightarrow{\text{id} \otimes _ \cdot P} \widehat{L} \otimes_{\widehat{K}} \mathcal{D}_{\widehat{K}} \xrightarrow{\text{id} \otimes \pi_{\widehat{K}}} \widehat{L} \otimes_{\widehat{K}} \mathcal{M}_{\widehat{K}} \longrightarrow 0$$

$$\rho^* \mathcal{M}_{\widehat{K}} \xrightarrow{\parallel}$$

exact. Deshalb ist

$$\begin{aligned} \rho^* \mathcal{M}_{\widehat{K}} &\cong \text{coker}(\text{id} \otimes _ \cdot P) && (\text{weil exact}) \\ &\cong \widehat{L} \otimes_{\widehat{K}} \mathcal{D}_{\widehat{K}} / \left((\widehat{L} \otimes_{\widehat{K}} \mathcal{D}_{\widehat{K}}) \cdot (\text{id} \otimes _ \cdot P) \right) && (\text{nach def. von coker}) \end{aligned}$$

Also mit Φ wie in Lemma 2.43 und $Q(t, \partial_t) := P(\rho(t), \rho'(t)^{-1} \partial_t)$ nach Lemma 2.45 ergibt sich

$$\begin{array}{ccccccc} 0 & \longrightarrow & \widehat{L} \otimes_{\widehat{K}} \mathcal{D}_{\widehat{K}} & \xrightarrow{\text{id} \otimes _ \cdot P} & \widehat{L} \otimes_{\widehat{K}} \mathcal{D}_{\widehat{K}} & \longrightarrow & \widehat{L} \otimes_{\widehat{K}} \mathcal{M}_{\widehat{K}} \longrightarrow 0 \\ & & \downarrow \cong \Phi & & \downarrow \cong \Phi & & \\ & & \mathcal{D}_{\widehat{L}} & \xrightarrow{_ \cdot Q} & \mathcal{D}_{\widehat{L}} & & \end{array}$$

als kommutatives Diagram. Nun, weil $_ \cdot Q$ injektiv ist, lässt sich die untere Zeile zu einer exacten Sequenz fortsetzen

$$\begin{array}{ccccccc} 0 & \longrightarrow & \widehat{L} \otimes_{\widehat{K}} \mathcal{D}_{\widehat{K}} & \xrightarrow{\text{id} \otimes _ \cdot P} & \widehat{L} \otimes_{\widehat{K}} \mathcal{D}_{\widehat{K}} & \xrightarrow{\text{id} \otimes \pi_{\widehat{K}}} & \widehat{L} \otimes_{\widehat{K}} \mathcal{M}_{\widehat{K}} \longrightarrow 0 \\ & & \downarrow \cong \Phi & & \downarrow \cong \Phi & & \\ 0 & \longrightarrow & \mathcal{D}_{\widehat{L}} & \xrightarrow{_ \cdot Q} & \mathcal{D}_{\widehat{L}} & \xrightarrow{\pi_{\widehat{L}}} & \mathcal{D}_{\widehat{L}} / \mathcal{D}_{\widehat{L}} \cdot Q \longrightarrow 0 \end{array}$$

und damit folgt die Behauptung.

Kommentar: Quelle?

Kommentar: Ingo sagt:

Nun zu deiner Situation: Da geht es jeweils um die rechten Endstücke. Anders als die Mittelstücke sind diese bis auf Isomorphie eindeutig bestimmt; C ist der Kokern von $(A \rightarrow B)$ und c der Kokern von $(a \rightarrow b)$. Aufgrund der Kommutativität des Quadrats links müssen daher diese Kokerne zueinander isomorph sein.

Konkret kannst du einen Isomorphismus über eine Diagrammjagd konstruieren: Sei $x \in C$ beliebig. Wir wollen ein zugehöriges Element in c angeben. Da $(B \rightarrow C)$ surjektiv ist, gibt es ein $y \in B$, das unter $(B \rightarrow C)$ auf x geschickt wird. Unser gesuchtes Element in c ist dann das Bild von y unter $(B \rightarrow b)$ und $(b \rightarrow c)$. Dann ist noch Wohldefiniertheit nachzuweisen. Die Umkehrfunktion konstruiert man auf

analoge Weise. Dann muss man natürlich noch nachrechnen, dass die beiden Morphismen zueinander invers sind.

(Geheimtipp: Linearität muss man, obwohl es eigentlich so scheint, tatsächlich nicht nachweisen – wenn man weiß, wie man intern in Topoi Mathematik betreiben kann. :-))

Kommentar:

- warum sind die schon zusammenhänge isomorph?
eventuell noch ein Lemma bei kurzen exacten Sequenzen hinzufügen

Lemma 2.47. [Sab90, 5.4.3] Sei $\mathcal{P}(\mathcal{M}_{\widehat{K}}) = \{\Lambda_1, \dots, \Lambda_r\}$ die Menge der Slopes von $\mathcal{M}_{\widehat{K}}$ und $\rho : t \mapsto x := t^p$, dann gilt für $\mathcal{P}(\rho^* \mathcal{M}_{\widehat{K}}) = \{\Lambda'_1, \dots, \Lambda'_r\}$, dass $\Lambda'_n = p \cdot \Lambda_n$.

Beweis: Sei $\mathcal{M}_{\widehat{K}} = \mathcal{D}_{\widehat{K}} / \mathcal{D}_{\widehat{K}} \cdot P$ mit $P = \sum a_i(x) \partial_x^i$, dann ist $\rho^* \mathcal{M}_{\widehat{K}} \cong \mathcal{D}_{\widehat{L}} / \mathcal{D}_{\widehat{L}} \cdot P'$ mit

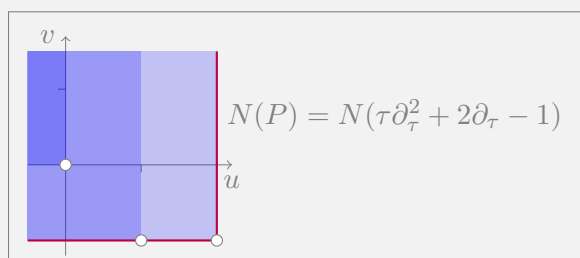
$$\begin{aligned} P'(t, \partial_t) &= P(\rho(t), \rho'(t)^{-1} \partial_t) \\ &= \sum a_i(\rho(t)) (\rho'(t)^{-1} \partial_t)^i \\ &= \sum a_i(t^p) ((p \cdot t^{p-1})^{-1} \partial_t)^i \end{aligned}$$

Kommentar: TODO: Hier weiter...

Beispiel 2.48 (pull-back). Hier nun ein explizit berechneter pull-back.

Kommentar: Beginne mit

$$\tilde{P} = \tau \partial_\tau^2 + 2\partial_\tau - 1$$



und gehe von τ über zu t via $\tau \rightarrow \frac{1}{t}$:

- was passiert mit der Ableitung ∂_τ ? Es gilt:

$$\partial_\tau(f(\frac{1}{\tau})) = \partial_t(f) \cdot (-\frac{1}{\tau^2}) = -\partial_t(f) \cdot t^2 = -t^2 \cdot \partial_t(f)$$

also:

$$\partial_\tau = -t^2 \partial_t$$

- was ist $\partial_t(t^2 \partial_t)$?

$$\begin{aligned} \partial_t t^2 \partial_t &= (\partial_t t) t \partial_t \\ &= (t \partial_t - 1) t \partial_t \\ &= t(\partial_t t) \partial_t - t \partial_t \\ &= t(t \partial_t - 1) \partial_t - t \partial_t \\ &= t^2 \partial_t^2 - 2t \partial_t \end{aligned}$$

- was passiert mit $\tilde{P} = \tau \partial_\tau^2 + 2 \partial_\tau - 1$?

$$\begin{aligned} \tilde{P} &= \tau \partial_\tau^2 + 2 \partial_\tau - 1 \\ &\xrightarrow{\tau \rightarrow \frac{1}{t}} \frac{1}{t} (-t^2 \partial_t)^2 + 2(-t^2 \partial_t) - 1 \\ &= \frac{1}{t} t^2 (\partial_t(t^2 \partial_t)) - 2t^2 \partial_t - 1 \\ &= t(\partial_t(t^2 \partial_t)) - 2t^2 \partial_t - 1 \\ &= t(t^2 \partial_t^2 - 2t \partial_t) - 2t^2 \partial_t - 1 \\ &= t^3 \partial_t^2 - 4t^2 \partial_t - 1 =: P \end{aligned}$$

Wir wollen $\mathcal{M}_{\hat{K}} := \mathcal{D}_{\hat{K}} / \mathcal{D}_{\hat{K}} \cdot P$ bzgl. $P := x^3 \partial_x^2 - 4x^2 \partial_x - 1$ betrachten. Unser Ziel ist es hier ganzzahlige slopes zu erhalten. Es gilt $\text{slopes}(P) = \{\frac{1}{2}\}$ (siehe Abbildung 2.5a) und es ist 2 der Hauptnenner aller Slopes. Wende den pull-back mit $\rho : t \rightarrow x := t^2$ an. Zunächst ein paar Nebenrechnungen, damit wir Lemma 2.42 einfacher anwenden können.

$$\begin{aligned} \partial_x &\rightarrow \frac{1}{\rho'(t)} \partial_t = \frac{1}{2t} \partial_t \\ \partial_x^2 &\rightarrow (\frac{1}{2t} \partial_t)^2 \end{aligned}$$

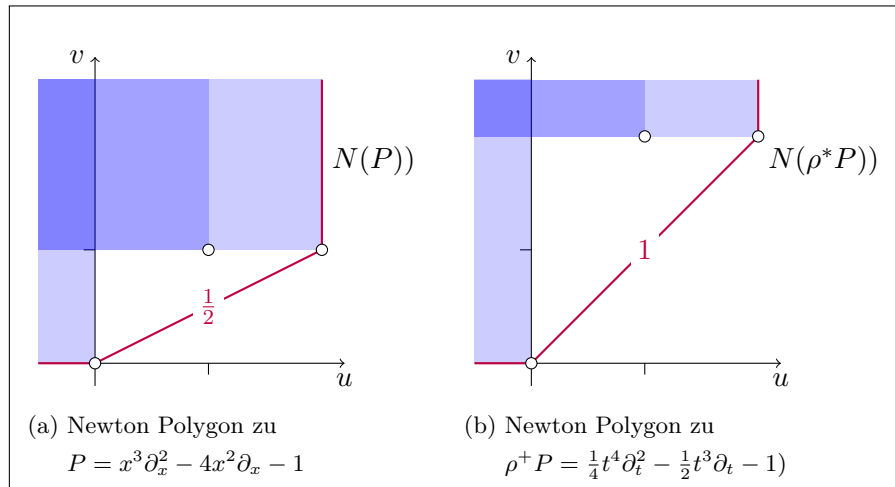
$$\begin{aligned}
 &= \frac{1}{2t} \partial_t \left(\frac{1}{2t} \partial_t \right) \\
 &= \frac{1}{2t} \left(-\frac{1}{2t^2} \partial_t + \frac{1}{2t} \partial_t^2 \right) \\
 &= \frac{1}{4t^2} \partial_t^2 - \frac{1}{4t^3} \partial_t
 \end{aligned}$$

also ergibt einsetzen

$$\begin{aligned}
 \rho^+ P &= t^6 \left(\frac{1}{4t^2} \partial_t^2 - \frac{1}{4t^3} \partial_t \right) - 4t^4 \frac{1}{2t} \partial_t - 1 \\
 &= \frac{1}{4} t^4 \partial_t^2 - t^3 \frac{1}{4t^3} \partial_t - 4t^3 \frac{1}{2} \partial_t - 1 \\
 &= \frac{1}{4} t^4 \partial_t^2 - 2 \frac{1}{4} t^3 \partial_t - 1
 \end{aligned}$$

Also ist $\rho^+ P = \frac{1}{4} t^4 \partial_t^2 - \frac{1}{2} t^3 \partial_t - 1$ mit $\text{slopes}(\rho^+ P) = \{1\}$ (siehe Abbildung 2.5b) und somit $\rho^* \mathcal{M}_{\widehat{K}} = \mathcal{D}_{\widehat{L}} / \mathcal{D}_{\widehat{L}} \cdot (\frac{1}{4} t^4 \partial_t^2 - \frac{1}{2} t^3 \partial_t - 1)$.

Abbildung 2.4: Zu Beispiel 2.48



Sei $\mathcal{N}_{\widehat{L}}$ ein endlich dimensionaler \widehat{L} -VR mit Verknüpfung, so definiere den push-forward wie folgt.

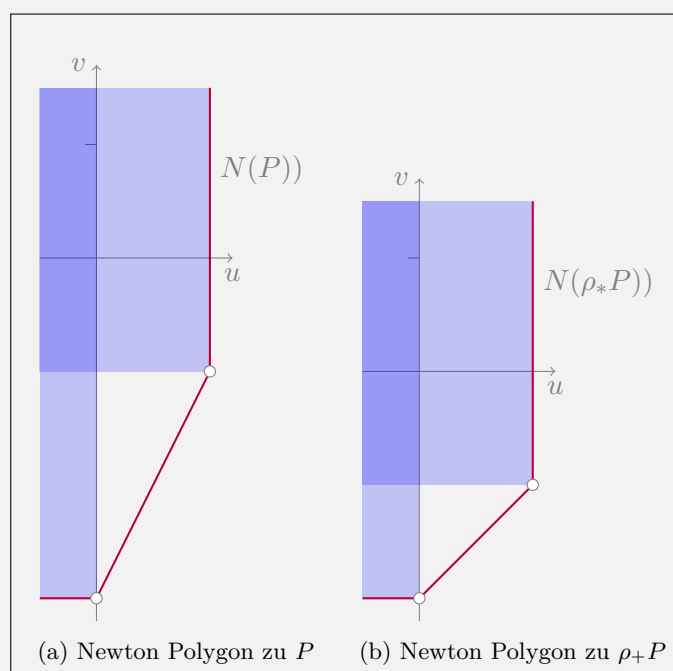
Definition 2.49 (push-forward). [Sab07, 1.a] Der *push-forward* oder das *Direktes Bild* $\rho_+ \mathcal{N}_{\widehat{L}}$ von $\mathcal{N}_{\widehat{L}}$ ist

- der \widehat{K} -VR $\rho_*\mathcal{N}$ ist definiert als der \mathbb{C} -Vektor Raum $\mathcal{N}_{\widehat{L}}$ mit der \widehat{K} -Vektor Raum Struktur durch die skalare Multiplikation $\cdot : \widehat{K} \times \mathcal{N}_{\widehat{L}} \rightarrow \mathcal{N}_{\widehat{L}}$ und

$$(f(x), m) \mapsto f(x) \cdot m := f(\rho(t))m$$
- mit der Wirkung ∂_x beschrieben durch $\rho'(t)^{-1}\partial_t$.

Kommentar:

Abbildung 2.5: Zu Beispiel 2.50



Beispiel 2.50 (push-forward). Für $\rho : t \rightarrow u^2$, $\varphi = \frac{1}{u^2}$ betrachte

$$\begin{aligned} \mathcal{E}^\varphi &\cong \widehat{\mathcal{D}}/\widehat{\mathcal{D}} \cdot (\partial_u + \partial_u \frac{1}{u^2}) \\ &= \widehat{\mathcal{D}}/\widehat{\mathcal{D}} \cdot \underbrace{(\partial_u + \frac{2}{u^3})}_{=: P} \end{aligned}$$

mit $\text{slopes}(P) = \{2\}$ (siehe Abbildung 2.6a). Bilde nun das Direkte Bild über ρ , betrachte dazu

$$\begin{aligned} \partial_u + \frac{2}{u^3} &= 2u(\frac{1}{2u}\partial_u + \frac{1}{u^4}) \\ &= 2u(\rho'(u)^{-1}\partial_u + \frac{1}{u^4}) \\ &= 2u(\partial_t + \frac{1}{t^2}) \end{aligned}$$

Also ist $\rho_+ \mathcal{E}^\varphi \cong \widehat{\mathcal{D}}/\widehat{\mathcal{D}} \cdot (\partial_t + \frac{1}{t^2})$ mit $\rho_+ P = \partial_t + \frac{1}{t^2}$ und $\text{slopes}(\rho_+ P) = \{1\}$ (siehe Abbildung 2.6b)

Satz 2.51. [Sab07, 1.a] Es gilt die Projektionsformel

$$\rho_+(\mathcal{N}_{\widehat{L}} \otimes_{\widehat{L}} \rho^+ \mathcal{M}_{\widehat{K}}) \cong \rho_+ \mathcal{N}_{\widehat{L}} \otimes_{\widehat{K}} \mathcal{M}_{\widehat{K}}. \quad (2.5)$$

Beweis :

$$\begin{aligned} \rho_+(\mathcal{N}_{\widehat{L}} \otimes_{\widehat{L}} \rho^+ \mathcal{M}_{\widehat{K}}) &= \rho_+(\mathcal{N}_{\widehat{L}} \otimes_{\widehat{L}} (\widehat{L} \otimes_{\widehat{K}} \mathcal{M}_{\widehat{L}})) && \text{(def von } \rho^+ \mathcal{M}_{\widehat{K}}) \\ &\cong \rho_+((\mathcal{N}_{\widehat{L}} \otimes_{\widehat{L}} \widehat{L}) \otimes_{\widehat{K}} \mathcal{M}_{\widehat{K}}) && \text{(Rechenregeln Tensorprodukt)} \\ &\cong \rho_+(\mathcal{N}_{\widehat{L}} \otimes_{\widehat{K}} \mathcal{M}_{\widehat{K}}) && \text{(Rechenregeln Tensorprodukt)} \\ &= \rho_+ \mathcal{N}_{\widehat{L}} \otimes_{\widehat{K}} \mathcal{M}_{\widehat{K}} && (?) \end{aligned}$$

■

Kommentar: Sei $\rho(u) = u^p = t$ und $\varphi(t)$ gegeben.

$$\begin{aligned} \rho^+ \mathcal{E}^{\varphi(t)} &= \mathcal{E}^{\varphi(\rho(u))} = \mathcal{E}^{\varphi(u^p)} \\ \rho^+ \rho_+ \mathcal{E}^{\varphi(u)} &= \bigoplus_{\zeta \in \mu_p} \mathcal{E}^{\varphi(\zeta \cdot u)} \end{aligned}$$

2.6 Twisten von \mathcal{D} -Moduln

[Cou95, Chap 5 §2]

Kommentar:

Lemma 2.52. [Hei10, Seite 44] Sei $\mathcal{M}_{\widehat{K}} = \widehat{\mathcal{D}}/\widehat{\mathcal{D}} \cdot P(x, \partial_x)$ und sei $\psi = \frac{\beta}{\lambda} x^{-\lambda}$. So gilt

$$\mathcal{M}_{\widehat{K}} \otimes_{\widehat{K}} \mathcal{E}^\varphi = \mathcal{D}_{\widehat{K}}/\mathcal{D}_{\widehat{K}} \cdot Q(x, \partial_x)$$

mit $Q(x, \partial_x) = P(x, \partial_x + \frac{\beta}{x^{\lambda+1}})$.

2.7 Fouriertransformation

Definition 2.53 (Fouriertransformation). [Blo04, Def 3.1] [GL04] [AV09, Def 6.1] Sei $P = \sum_{i=0}^d a_i(x) \partial_x^i$. Dann ist die *Fouriertransformierte* von P gegeben durch

$$\mathcal{F}_P := \mathcal{F}_P(z, \partial_z) = \sum_{i=0}^d a_i(\partial_z) (-z)^i$$

Definition 2.54 (Fouriertransformation von lokalisierten holonomen D-Moduln). Ist $\mathcal{M}_{\widehat{K}} = \widehat{K}/\widehat{K} \cdot P$ so ist die Fouriertransformierte davon ${}^{\mathcal{F}}\mathcal{M}_{\widehat{K}} = \widehat{K}/\widehat{K} \cdot \mathcal{F}_P(x, \partial_x)$.

Beispiel 2.55. Sei $P = t^2 \partial_t + 1$ dann ist die Fouriertransformierte davon $\mathcal{F}_P = \dots$

Kommentar: TODO: hier weiter

3 Elementare Meromorphe Zusammenhänge

Kommentar: einführen als Bausteine oder kleinste Meromorphe Zusammenhänge

Definition 3.1. [Sab07, 1.a] Sei $\varphi \in \widehat{K}$. Wir schreiben \mathcal{E}_K^φ für den (formalen) Rang 1 Vektorraum $\mathbb{C}((x)) \stackrel{\text{def}}{=} \widehat{K}$ ausgestattet mit dem Zusammenhang $\nabla = \partial_x + \partial_x \varphi$, im speziellen also $\nabla_{\partial_x} 1 = \partial_x 1 = \varphi'$.

Kommentar: Also

$$\begin{aligned} \mathcal{E}^\varphi &= \mathbb{C}((x)) \xrightarrow{\partial_x} \mathbb{C}((x)) \\ 1 &\mapsto \varphi'(x) \\ f(x) &\mapsto f'(x) + f(x)\varphi'(x) \end{aligned}$$

Bemerkung 3.2. 1. Auf die Angabe von des Rang 1 Vektorraums im Subscript wird im folgendem meist verzichtet.

2. Offensichtlich ist $\mathcal{E}^\varphi \cong \mathcal{D}_{\widehat{K}}/\mathcal{D}_{\widehat{K}} \cdot (\partial_x - \varphi'(x))$, weil für den zyklischen Vektor 1 gilt, dass $\partial_x \cdot 1 = \varphi'(x) \cdot 1$.

Bemerkung 3.3. [Sab07, 1.a] Es gilt $\mathcal{E}^\varphi \cong \mathcal{E}^\psi$ genau dann wenn $\varphi \equiv \psi \pmod{\mathbb{C}[[x]]}$.

Kommentar: ausformulierte version eines beweises im paper sabbah_{Fourier} – local.pdf zulemma2.4

Sei $\rho : t \mapsto x := t^p$ und $\mu_\xi : t \mapsto \xi t$.

Lemma 3.4. [Sab07, Lem 2.4] Für alle $\varphi \in \widehat{L}$ gilt

$$\rho^+ \rho_+ \mathcal{E}^\varphi = \bigoplus_{\xi^p=1} \mathcal{E}^{\varphi \circ \mu_\xi}.$$

Beweis: Wir wollen zeigen, dass das folgende Diagram, für einen passenden Isomorphismus, kommutiert:

$$\begin{array}{ccc} \rho^+ \rho_+ \mathcal{E}^{\varphi(u)} & \xrightarrow{\cong} & \bigoplus_{\xi^p=1} \mathcal{E}^{\varphi \circ \mu_\xi} \\ \downarrow \partial_t & & \downarrow \partial_t \\ \rho^+ \rho_+ \mathcal{E}^{\varphi(u)} & \xrightarrow{\cong} & \bigoplus_{\xi^p=1} \mathcal{E}^{\varphi \circ \mu_\xi} \end{array}$$

Es sei oBdA $\varphi \in t^{-1}\mathbb{C}[t^{-1}]$, dies ist nach Bemerkung 3.3 berechtigt. Wir wählen eine \widehat{L} Basis e des Rang 1 \widehat{L} -Vektorraum \mathcal{E}^φ und damit erhält man die Familie $e, te, \dots, t^{p-1}e$ als \widehat{K} -Basis von $\rho_+ \mathcal{E}^\varphi$. Durch die Setzung $e_k := t^{-k} \otimes_{\widehat{K}} t^k e$ wird die Familie $\mathbf{e} := (e_0, \dots, e_{p-1})$ eine \widehat{L} -Basis von $\rho^+ \rho_+ \mathcal{E}^\varphi$. Zerlege nun $t\varphi'(t) = \sum_{j=0}^{p-1} t^j \psi_j(t^p) \in t^{-2}\mathbb{C}[t^{-1}]$ mit $\psi_j \in \mathbb{C}[x^{-1}]$ für alle $j > 0$ und $\psi_0 \in x^{-1}\mathbb{C}[x^{-1}]$ (siehe: Anhang A). Es gilt:

$$t\partial_t e_k = \sum_{i=0}^{p-1-k} t^i \psi_i(t^p) e_{k+1} + \sum_{i=p-k}^{p-1} t^i \psi_i(t^p) e_{k+i-p}$$

denn:

$$\begin{aligned} t\partial_t e_k &= t\partial_t(t^{-k} \otimes_{\widehat{K}} t^k e) \\ &= t(-kt^{-k-1} \otimes_{\widehat{K}} t^k e + pt^{p-1} \cdot t^{-k} \otimes_{\widehat{K}} \partial_x(\underbrace{t^k e}_{\in \rho_+ \mathcal{E}^\varphi})) \\ &= -kt^{-k} \otimes_{\widehat{K}} t^k e + pt^{p-1} t^{-k+1} \otimes_{\widehat{K}} (pt^{p-1})^{-1} (kt^{k-1} e + t^k \varphi'(t) e) \\ &= -kt^{-k} \otimes_{\widehat{K}} t^k e + t^{-k+1} \otimes_{\widehat{K}} (kt^{k-1} e + t^k \varphi'(t) e) \\ &= \underbrace{-kt^{-k} \otimes_{\widehat{K}} t^k e + t^{-k+1} \otimes_{\widehat{K}} kt^{k-1} e}_{=0} + t^{-k+1} \otimes_{\widehat{K}} t^k \varphi'(t) e \\ &= t^{-k} \otimes_{\widehat{K}} t^{k+1} \varphi'(t) e \\ &= \sum_{i=0}^{p-1} t^{-k} \otimes_{\widehat{K}} t^k \underbrace{t^i \psi_i(t^p)}_{\in \widehat{K}} e \\ &= \sum_{i=0}^{p-1} t^i \psi_i(t^p) (t^{-k} \otimes_{\widehat{K}} t^k e) \\ &= \sum_{i=0}^{p-1-k} t^i \psi_i(t^p) e_{k+1} + \sum_{i=p-k}^{p-1} t^i \psi_i(t^p) e_{k+i-p} \end{aligned}$$

Sei

$$V := \begin{pmatrix} 0 & & 1 \\ 1 & 0 & \\ & \ddots & \ddots \\ & & 1 & 0 \end{pmatrix}$$

so dass $\mathbf{e} \cdot V = (e_1, \dots, e_{p-1}, e_0)$ gilt, so dass gilt:

$$t\partial_t \mathbf{e} = \mathbf{e} \left[\sum_{j=0}^{p-1} t^j \psi_j V^j \right]$$

denn:

$$\begin{aligned} t\partial_t \mathbf{e} &= (t\partial_t e_0, \dots, t\partial_t e_{p-1}) \\ &= \left(\sum_{i=0}^{p-1-k} t^i \psi_i(t^p) e_{k+1} + \sum_{i=p-k}^{p-1} t^i \psi_i(t^p) e_{k+i-p} \right)_{k \in \{0, \dots, p-1\}} \\ &= \mathbf{e} \begin{pmatrix} u^{p-1} \psi_{p-1}(t^p) & \dots & t^3 \psi_3(t^p) & t^2 \psi_2(t^p) & t^1 \psi_1(t^p) \\ t^1 \psi_1(t^p) & t^{p-1} \psi_{p-1}(t^p) & & \ddots & t^2 \psi_2(t^p) \\ t^2 \psi_2(t^p) & t^1 \psi_1(t^p) & \ddots & & t^3 \psi_3(t^p) \\ t^3 \psi_3(t^p) & \ddots & \ddots & \ddots & \vdots \\ \vdots & & \ddots & t^1 \psi_1(t^p) & t^{p-1} \psi_{p-1}(t^p) \\ t^{p-2} \psi_{p-2}(t^p) & \dots & t^3 \psi_3(t^p) & t^2 \psi_2(t^p) & t^1 \psi_1(t^p) & t^{p-1} \psi_{p-1}(t^p) \end{pmatrix} \\ &= \mathbf{e} \left[\sum_{j=0}^{p-1} t^j \psi_j(t^p) V^j \right] \end{aligned}$$

Die Wirkung von ∂_t auf die Basis von $\rho^+ \rho_+ \mathcal{E}^{\varphi(t)}$ ist also Beschrieben durch

$$\partial_t \mathbf{e} = \mathbf{e} \left[\sum_{j=0}^{p-1} t^{j-1} \psi_j V^j \right].$$

Da V das Minimalpolynom $\chi_V(x) = X^p - 1$ hat, können wir diese Matrix durch Passendes T auf die Form

$$D := TVT^{-1} = \begin{pmatrix} \xi^0 & & \\ & \xi^1 & \\ & & \ddots \\ & & & \xi^{p-1} \end{pmatrix},$$

mit $\xi^p = 1$, bringen. So dass gilt:

$$\begin{aligned} T \left[\sum_{j=0}^{p-1} t^{j-1} \psi_j(t^p) V^j \right] T^{-1} &= \left[\sum_{j=0}^{p-1} t^{j-1} \psi_j(t^p) (TVT^{-1})^j \right] \\ &= \left[\sum_{j=0}^{p-1} t^{j-1} \psi_j(t^p) D^j \right] \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 &= \begin{pmatrix} \sum_{j=0}^{p-1} t^{j-1} \psi_j & & & \\ & \sum_{j=0}^{p-1} t^{j-1} \psi_j (\xi^1)^j & & \\ & & \ddots & \\ & & & \sum_{j=0}^{p-1} t^{j-1} \psi_j (\xi^{p-1})^j \end{pmatrix} \\
 &= \begin{pmatrix} \sum_{j=0}^{p-1} t^{j-1} \psi_j & & & \\ & \sum_{j=0}^{p-1} (t\xi^1)^{j-1} \psi_j \xi^1 & & \\ & & \ddots & \\ & & & \sum_{j=0}^{p-1} (t\xi^{p-1})^{j-1} \psi_j \xi^{p-1} \end{pmatrix} \\
 &= \begin{pmatrix} \varphi'(t) & & & \\ & \varphi'(\xi t) \xi^1 & & \\ & & \ddots & \\ & & & \varphi'(\xi^{p-1} t) \xi^{p-1} \end{pmatrix}
 \end{aligned}$$

Damit wissen wir bereits, das im Diagram

$$\begin{array}{ccccccc}
 \rho^+ \rho_+ \mathcal{E}^{\varphi(u)} & \xleftarrow{\cong} & \widehat{L}^p & \xleftarrow[\cong]{T} & \widehat{L}^p & \xrightarrow[\cong]{\Phi} & \bigoplus_{\xi^p=1} \mathcal{E}^{\varphi \circ \mu_\xi} \\
 \downarrow \partial_t & & \downarrow \sum_{j=0}^{p-1} t^{j-1} \psi_j V^j & & \downarrow \sum_{j=0}^{p-1} t^{j-1} \psi_j D^j & & \downarrow \partial_t \\
 \rho^+ \rho_+ \mathcal{E}^{\varphi(u)} & \xleftarrow{\cong} & \widehat{L}^p & \xleftarrow[\cong]{T} & \widehat{L}^p & \xrightarrow[\cong]{\Phi} & \bigoplus_{\xi^p=1} \mathcal{E}^{\varphi \circ \mu_\xi} \\
 \underbrace{\hspace{15em}} & & & & & & \\
 & & (\star) & & & &
 \end{array}$$

der mit (\star) bezeichnete Teil kommutiert. Um zu zeigen, dass alles kommutiert, zeigen wir noch, dass

$$\partial_t(\Phi(x)) = \Phi\left(\sum_{j=0}^{p-1} t^{j-1} \psi_j(x) D^j\right) \quad \forall x \in \widehat{L}^p$$

gilt.

Kommentar: TODO: zeige das noch

Sei $x = {}^t(x_1, \dots, x_p) \in \widehat{L}^p$. So ist

$$\partial_t(\Phi(x)) = \partial_t({}^t(\dots))$$

und

$$\Phi\left({}^t x \left(\sum_{j=0}^{p-1} t^{j-1} \psi_j(t^p) D^j\right)\right) = \Phi\left((x_1, \dots, x_p) \begin{pmatrix} \varphi'(t) & & & \\ & \varphi'(\xi t) \xi^1 & & \\ & & \ddots & \\ & & & \varphi'(\xi^{p-1} t) \xi^{p-1} \end{pmatrix}\right)$$

$$= \Phi\left((x_1\varphi'(t), x_2\varphi'(\xi t)\xi, \dots, x_p\varphi'(\xi^{p-1}t)\xi^{p-1})\right)$$

■

3.1 Definition von Notizen und [Sab90, Cor 5.2.6]

Definition 3.5. Ein *Elementarer Meromorpher Zusammenhang* ist ein Zusammenhang \mathcal{M} , für den es $\psi \in \mathbb{C}[[x]]$, $\alpha \in \mathbb{C}$ und $p \in \mathbb{N}$ gibt, so dass

$$\mathcal{M} \cong \mathcal{E}^\psi \otimes R_{\alpha,p},$$

mit $R_{\alpha,p} := \mathcal{D}/\mathcal{D}(x\partial_x - \alpha)^p$, ist.

Lemma 3.6. $\mathcal{E}^\psi \otimes R_{\alpha,p} \cong \mathcal{D}/\mathcal{D} \cdot (x\partial_x - (\alpha + x\frac{\partial\psi}{\partial x}))^p$

Beweis: [Hei10, Lem 5.12]

■

3.2 Definition in [Sab90]

Kommentar: in [Sab90] Teil 5.4.4 Seite 34

Definition 3.7. Sei $R(z) = \sum_{i=0}^k \alpha_i z^i \in z\mathbb{C}[z]$. So ist der Meromorphe Zusammenhang $\mathcal{F}_{\widehat{K}}^R$ als Vektorraum isomorph zu \widehat{K} und hat der Basis $e(R)$. Die Wirkung von $x\partial_x$ ist definiert durch

$$x\partial_x(\varphi \cdot e(R)) = \left[\left(x \frac{\partial\varphi}{\partial x} \right) + \varphi x \frac{\partial R(x^{-1})}{\partial x} \right] \cdot e(R)$$

Kommentar: hat das was mit fourier zu tun

Kommentar: This means that $e(R)$ plays the role of $\exp R(x^{-1})$.

Definition 3.8. Ein *Elementarer Meromorpher Zusammenhang* (über \widehat{K}) ist ein Zusammenhang welcher zu $\mathcal{F}_{\widehat{K}}^R \otimes_{\widehat{K}} \mathcal{G}_{\widehat{K}}$ isomorph ist. Wobei hier $\mathcal{G}_{\widehat{K}}$ ein Elementarer regulärer Meromorpher Zusammenhang.

3.3 Definition in [Sab07]

Definition 3.9 (Elementarer formaler Zusammenhang). [Sab07, Def 2.1]

Kommentar: Alternative. ausführlichere / komplexe definition [Sab90, Def 5.4.5.]

Zu einem gegebenen $\rho \in t\mathbb{C}[[t]]$, $\varphi \in \widehat{L} \stackrel{\text{def}}{=} \mathbb{C}((t))$ und einem endlich dimensionalen \widehat{L} -Vektorraum R mit regulärem Zusammenhang ∇ , definieren wir den assoziierten Elementaren endlich dimensional \widehat{K} -Vektorraum mit Zusammenhang, durch:

$$El(\rho, \varphi, R) = \rho_+(\mathcal{E}^\varphi \otimes R)$$

[Sab07, nach Def 2.1] Bis auf Isomorphismus hängt $El(\rho, \varphi, R)$ nur von $\varphi \bmod \mathbb{C}[[t]]$ ab.

Lemma 3.10. [Sab07, Lem 2.2]

Lemma 3.11. [Sab07, Lem 2.6.] *Es gilt $El([t \mapsto t^p], \varphi, R) \cong El([t \mapsto t^p], \psi, S)$ genau dann, wenn*

- *es ein ζ gibt, mit $\zeta^p = 1$ und $\psi \circ \mu_\zeta \equiv \varphi \bmod \mathbb{C}[[t]]$*
- *und $S \cong R$ als \widehat{L} -Vektorräume mit Zusammenhang.*

Beweis: [Sab07, Lem 2.6.] ■

Proposition 3.12. [Sab07, Prop 3.1] *Jeder irreduzible endlich dimensionale \widehat{K} -Vektorraum \mathcal{M} mit Zusammenhang ist isomorph zu $\rho_+(\mathcal{E}^\varphi \otimes L)$, wobei $\varphi \in t^{-1}\mathbb{C}[t^{-1}]$, $\rho : t \rightarrow t^p$ vom Grad $p \geq 1$ und ist minimal unter φ . (siehe [Sab07, Rem 2.8]) und L ist ein Rang 1 \widehat{L} -Vektorraum mit regulärem Zusammenhang.*

Beweis: [Sab07, Prop 3.1] ■

4 Levelt-Turrittin-Theorem

Das Levelt-Turrittin-Theorem ist ein Satz, der hilft, Meromorphe Zusammenhänge in ihre irreduziblen Komponenten zu zerlegen.

4.1 Klassische Version

Satz 4.1. [Sab90, Thm 5.4.7] *Sie $\mathcal{M}_{\widehat{K}}$ ein formaler Meromorpher Zusammenhang. So gibt es eine ganze Zahl p so dass der Zusammenhang $\mathcal{M}_{\widehat{L}} := \rho^+ \mathcal{M}_{\widehat{K}}$, mit $\rho : t \mapsto x := t^p$, isomorph zu einer direkten Summe von formalen elementaren Meromorphen Zusammenhänge ist.*

Der folgende Beweis stammt hauptsächlich aus [Sab90, Seite 35].

Beweis: Zum Beweis wird Induktion auf die Lexicographisch geordnetem Paare $(\dim_{\widehat{K}} \mathcal{M}_{\widehat{K}}, \kappa)$ angewendet. Wobei $\kappa \in \mathbb{N} \cup \{\infty\}$ dem größtem Slope von $\mathcal{M}_{\widehat{K}}$. Es wird $\kappa = \infty$ gesetzt, falls der größte Slope nicht Ganzzahlig ist.

Kommentar: TODO: induktionsanfang und -schritt kennzeichnen

Wir nehmen oBdA an, dass $\mathcal{M}_{\widehat{K}}$ genau einen Slope Λ hat, sonst Teile $\mathcal{M}_{\widehat{K}}$ mittels Satz 2.30 in Meromorphe Zusammenhänge mit je einem Slope und wende jeweils die Induktion an. Mit $\Lambda =: \frac{\lambda_0}{\lambda_1}$ (vollständig gekürzt) Definieren wir die dem Slope entsprechende Linearform $L(s_0, s_1) := \lambda_0 s_0 + \lambda_1 s_1$. Wir nennen $\sigma_L(P) \in \widehat{K}[\xi]$ die *Determinanten Gleichung* von P . Da L zu einem Slope von P gehört, besteht $\sigma_L(P)$ aus zumindest zwei Monomen.

Kommentar: and is homogeneous of degree $\text{ord}_L(P) = 0$ because P is chosen with coefficients in $\mathbb{C}[[x]]$, one of them, being a unit.

Schreibe

$$\begin{aligned} \sigma_L(P) &= \sum_{L(i, i-j) = \text{ord}_L(P)} \alpha_{ij} x^j \xi^i \\ &= \sum_{L(i, i-j) = 0} \alpha_{ij} x^j \xi^i. \end{aligned}$$

Sei $\theta := x^{\lambda_0 + \lambda_1} x i^{\lambda_1}$ so können wir

$$\sigma_L(P) = \sum_{k \geq 0} \alpha_k \theta^k$$

schreiben, wobei $\alpha_0 \neq 0$ ist.

Erster Fall: $\lambda_1 = 1$. Das bedeutet, dass der Slope ganzzahlig ist. Betrachte die Faktorisierung

$$\sigma_L(P) = \varepsilon \prod_{\beta} (\theta - \beta)^{\gamma_{\beta}}.$$

Wobei $\varepsilon \in \mathbb{C}$ eine Konstante ist. Sei β_0 eine der Nullstellen. So setze $R(z) := (\beta_0/(\lambda_0 + 1))z^{\lambda_0 + 1}$ und betrachte $\mathcal{M}_{\widehat{K}} \otimes \mathcal{F}_{\widehat{K}}^R$.

Lemma 4.2. Falls e ein zyklischer Vektor für $\mathcal{M}_{\widehat{K}}$ ist, so ist $e \otimes e(R)$ ein zyklischer Vektor für $\mathcal{M}_{\widehat{K}} \otimes \mathcal{F}_{\widehat{K}}^R$.

Beweis: TODO ■

Kommentar: AB HIER VLT NICHT RICHTIG, nur versuch

Falls $P(x, \partial_x) \cdot e = 0$ gilt

$$P\left(x, \partial_x - \frac{\partial R(x^{-1})}{\partial x}\right) \cdot e \otimes e(R) = 0$$

und hier haben wir

$$\begin{aligned} \frac{\partial R(x^{-1})}{\partial x} &= \frac{\partial(\frac{\beta_0}{\lambda_0 + 1} x^{-(\lambda_0 + 1)})}{\partial x} \\ &= -\beta_0 x^{-(\lambda_0 + 2)}. \end{aligned}$$

Schreibe $P' = P(x, \partial_x + \beta_0 x^{-(\lambda_0 + 2)})$.

Lemma 4.3. Es gilt, dass P' Koeffizienten in $\mathbb{C}[[x]]$ hat.

Beweis: TODO ■

Des weiteren ist $\sigma_L(P') = \sum_{k \geq 0} \alpha_k (\theta + \beta_0)^k$. Wir unterscheiden nun 2 Unterfälle:

1. **Die Determinanten Gleichung $\sigma_L(P)$ hat nur eine Nullstelle.**

Kommentar: TODO: Hier weiter

2. **Die Determinanten Gleichung $\sigma_L(P)$ hat mehrere Nullstellen.**

Kommentar: TODO: Hier weiter

Zweiter Fall: $\lambda_1 \neq 1$. In diesem Fall ist einzige Slope Λ nicht ganzzahlig. Mache deshalb einen pull-back mit λ_1 . Sei $\rho : t \mapsto x := t^{\lambda_1}$ und erhalte P' so dass $\rho^* \mathcal{M}_{\widehat{K}} = \mathcal{D}_{\widehat{L}} / \mathcal{D}_{\widehat{L}} \cdot P'$. Nach Lemma 2.47 hat P' den einen Slope $\Lambda \cdot \lambda_1 = \lambda_0$. Damit können wir nun die zugehörige Linearform $L' := \lambda_0 s_0 + s_1$ definieren. Es gilt dass

$$\sigma_{L'}(P') = \dots$$

ist, welches zumindest zwei unterschiedliche Nullstellen hat. Nun wendet man den zweiten Unterfall des ersten Fall an. ■

4.2 Sabbah's Refined version

Proposition 4.4. [Sab07, Prop 3.1] Jeder irreduzible endlich dimensionale formale Meromorphe Zusammenhang $\mathcal{M}_{\widehat{L}}$ ist isomorph zu $\rho_+(\mathcal{E}^\varphi \otimes_{\widehat{K}} S)$, wobei $\varphi \in x^{-1}\mathbb{C}[x^{-1}]$, $\rho : x \mapsto t = x^p$ mit $\text{grad } p \geq 1$ minimal bzgl. φ (siehe [Sab07, Rem 2.8]), und S ist ein Rang 1 \widehat{K} -Vektor Raum mit regulärem Zusammenhang.

Beweis: [Sab07, Prop 3.1] ■

Satz 4.5 (Refined Turrittin-Levelt). [Sab07, Cor 3.3] Jeder endlich dimensionale Meromorphe Zusammenhang $\mathcal{M}_{\widehat{K}}$ kann in eindutiger weiße geschrieben werden als direkte Summe $\bigoplus \text{El}(\rho, \varphi, R) \stackrel{\text{def}}{=} \bigoplus \rho_+(\mathcal{E}^\varphi) \otimes R$, so dass jedes $\rho_+ \mathcal{E}^\varphi$ irreduzibel ist und keine zwei $\rho_+ \mathcal{E}^\varphi$ isomorph sind.

Kommentar: In welchem Raum ist \mathcal{M} ?? in L oder in K

Beweis: [Sab07, Cor 3.3] ■

5 DIE Klasse der Fourier-Transformationen

In diesem Kapitel werden Beispiele einer speziellen Klasse von \mathcal{D} -Moduln diskutiert. Dazu wird im folgendem zu 2 Beispielen unter anderem explizit der Beweis aus [Sab90] zur Levelt-Turrittin-Zerlegung nachvollzogen.

Es wird zunächst ein allgemeines Rezept gegeben, welches zu gegebenem φ D-Moduln ergibt. Im Laufe des Kapitels werden immer speziellere φ betrachtet und zuletzt wird für konkrete Beispiele eine explizite Rechnung gegeben.

5.1 Rezept für allgemeine φ

Hier wollen wir nun eine Spezielle Klasse von Meromorphen Zusammenhängen, die die durch das folgende Rezept entstehen.

1. Wähle zunächst ein $\varphi \in \{\varphi = \sum_{k \in I} \frac{a_k}{t^k} \mid I \subset \mathbb{N} \text{ endlich, } a_k \in \mathbb{C}\}$ aus
2. und beginne mit \mathcal{E}^φ . Es gilt

$$\begin{aligned}
 \mathcal{E}^\varphi &= \mathcal{D}_{\widehat{L}} / \mathcal{D}_{\widehat{L}} \cdot \left(\partial_t - \frac{d}{dt} \varphi(t) \right) \\
 &= \mathcal{D}_{\widehat{L}} / \mathcal{D}_{\widehat{L}} \cdot \underbrace{\left(\text{Hauptnenner} \right)}_{\in \mathbb{C}[t] \subset \mathcal{D}_{\widehat{L}}^*} \cdot \left(\partial_t - \frac{d}{dt} \varphi(t) \right) \\
 &= \mathcal{D}_{\widehat{L}} / \mathcal{D}_{\widehat{L}} \cdot \underbrace{\left(t^{\max(I)+1} \cdot \left(\partial_t - \frac{d}{dt} \varphi(t) \right) \right)}_{=: Q(t, \partial_t)} \triangleleft \mathcal{D}_{\widehat{L}}
 \end{aligned}$$

Dies ändert den Meromorphen Zusammenhang nicht, weil $t^{\max(I)+1}$ eine Einheit in $\mathcal{D}_{\widehat{L}}$ (und auch in \mathcal{D}_L) ist.

3. Fouriertransformiere \mathcal{E}^φ und erhalte $\mathcal{F}\mathcal{E}^\varphi = \mathcal{D}_{\widehat{L}} / \mathcal{D}_{\widehat{L}} \cdot \mathcal{F}Q(z, \partial_z) \stackrel{\text{def}}{=} \mathcal{D}_{\widehat{L}} / \mathcal{D}_{\widehat{L}} \cdot \underbrace{Q(\partial_z, -z)}_{\in \mathbb{C}[z] \langle \partial_z \rangle}$

4. Wende den Übergang $x \rightsquigarrow z^{-1}$ an.

Was passiert mit der Ableitung ∂_x ? Es gilt

$$\partial_x(f(\frac{1}{x})) = \partial_z(f) \cdot (-\frac{1}{x^2}) = -\partial_z(f) \cdot z^2 = -z^2 \cdot \partial_z(f)$$

also $\partial_x \rightsquigarrow -z^2 \partial_z$.

$$P_\varphi(x, \partial_x) := \mathcal{F}_Q(x^{-1}, -x^2 \partial_x) \in \mathbb{C}[t] \langle \partial_t \rangle$$

5. Erhalte den zu P_φ assoziierten Meromorphen Zusammenhang $\mathcal{M}_\varphi = \mathcal{D}_{\widehat{K}} / \mathcal{D}_{\widehat{K}} \cdot P_\varphi$.

Wende das Rezept allgemein für $\varphi = \sum_{k \in I} \frac{a_k}{t^k}$ an. So ist

$$\begin{aligned} \tilde{Q}(t, \partial_t) &= \partial_t - \frac{d}{dt} \varphi(t) \\ &= \partial_t + \sum_{k \in I} k \frac{a_k}{t^{k+1}} \end{aligned} \quad \in \mathbb{C}[t][t^{-1}] \langle \partial_t \rangle$$

$$\begin{aligned} Q(t, \partial_t) &= t^{\max(I)+1} \partial_t + \sum_{k \in I} k \frac{a_k}{t^{k-\max(I)}} \\ &= t^{\max(I)+1} \partial_t + \sum_{k \in I} k a_k t^{\max(I)-k} \end{aligned} \quad \in \mathbb{C}[t] \langle \partial_t \rangle$$

$$\begin{aligned} \mathcal{F}_Q(z, \partial_z) &= Q(\partial_z, -z) \\ &= -\partial_z^{\max(I)+1} z + \sum_{k \in I} k a_k \partial_z^{\max(I)-k} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} P_\varphi(x, \partial_x) &= \mathcal{F}_Q(x^{-1}, -x^2 \partial_x) \\ &= -(-x^2 \partial_x)^{\max(I)+1} x^{-1} + \sum_{k \in I} k a_k (-x^2 \partial_x)^{\max(I)-k} \\ &= (-x^2 \partial_x)^{\max(I)} \underbrace{x^2 \partial_x x^{-1}} + \sum_{k \in I} k a_k (-x^2 \partial_x)^{\max(I)-k} \\ &= (-x^2 \partial_x)^{\max(I)} \overbrace{(x \partial_x - 1)} + \sum_{k \in I} k a_k (-x^2 \partial_x)^{\max(I)-k} \end{aligned} \quad \in \mathbb{C}[x] \langle \partial_x \rangle$$

Im Anhang B wird das $(x^2 \partial_x)^k$ genauer diskutiert. Dies führt aber hier an dieser Stelle nicht mehr weiter in die richtige Richtung.

Ab jetzt nur noch für den Spezialfall $\varphi = \frac{a}{t^q}$. Also sei $\mathcal{M}_\varphi = \mathcal{D}_{\widehat{K}} / \mathcal{D}_{\widehat{K}} \cdot P_\varphi$ mit

$$P_\varphi(x, \partial_x) = (-x^2 \partial_x)^q (x \partial_x - 1) + qa,$$

so dass

Lemma 5.1. $\mathcal{P}(\mathcal{M}_\varphi) = \{\frac{q}{q+1}\}$ gilt.

Beweis: [Sab07, 5.b.] TODO

Kommentar: über L-Symbol? Stützfunktion? Versuch:

Mit $L = qs_0 + (q+1)s_2$ gilt

$$\sigma_L(P) = \pm x^{2q+1} \partial_x^{q+1} + qa,$$

welches aus mehr als einem Monom besteht, deshalb ist der zu L zugehörige Slope $\frac{q}{q+1}$ ein Slope von P . Da $q+1$ die höchste vorkommende ∂_x -Potez ist, kann es auch keinen weiteren Slope geben. ■

Also ist ein pull-back mit Grad $q+1$ nötig, um einen ganzzahligen Slope zu bekommen.

Kommentar: Sei $\rho : t \mapsto x := t^{q+1}$ so ist

$$\begin{aligned} \rho^+ \mathcal{M}_\varphi &= \rho^+(\mathcal{D}_{\widehat{K}}/\mathcal{D}_{\widehat{K}} \cdot P_\varphi(x, \partial_x)) \\ &= \mathcal{D}_{\widehat{K}}/\mathcal{D}_{\widehat{K}} \cdot (\rho^* P_\varphi(x, \partial_x)) \\ &= \mathcal{D}_{\widehat{K}}/\mathcal{D}_{\widehat{K}} \cdot (P_\varphi(\rho(t), \rho'(t)^{-1} \partial_t)) \\ &= \mathcal{D}_{\widehat{K}}/\mathcal{D}_{\widehat{K}} \cdot (P_\varphi(t^{q+1}, \frac{1}{(q+1)t^q} \partial_t)) \\ &= \mathcal{D}_{\widehat{K}}/\mathcal{D}_{\widehat{K}} \cdot ((-(t^{q+1})^2 \frac{1}{(q+1)t^q} \partial_t)^q (t^{q+1} \frac{1}{(q+1)t^q} \partial_t - 1) + qa) \\ &= \mathcal{D}_{\widehat{K}}/\mathcal{D}_{\widehat{K}} \cdot ((-\frac{1}{q+1} t^{2(q+1)-q} \partial_t)^q (\frac{1}{q+1} t \partial_t - 1) + qa) \\ &= \mathcal{D}_{\widehat{K}}/\mathcal{D}_{\widehat{K}} \cdot ((-\frac{1}{q+1} t^{q+2} \partial_t)^q (\frac{1}{q+1} t \partial_t - 1) + qa) \end{aligned}$$

Sei $\rho : t \mapsto x := -(q+1)t^{q+1}$ so ist

$$\begin{aligned} \rho^+ \mathcal{M}_\varphi &= \rho^+(\mathcal{D}_{\widehat{K}}/\mathcal{D}_{\widehat{K}} \cdot P_\varphi(x, \partial_x)) \\ &= \mathcal{D}_{\widehat{K}}/\mathcal{D}_{\widehat{K}} \cdot (\rho^* P_\varphi(x, \partial_x)) \\ &= \mathcal{D}_{\widehat{K}}/\mathcal{D}_{\widehat{K}} \cdot (P_\varphi(\rho(t), \rho'(t)^{-1} \partial_t)) \\ &= \mathcal{D}_{\widehat{K}}/\mathcal{D}_{\widehat{K}} \cdot (P_\varphi(-(q+1)t^{q+1}, -(q+1)^{-1} \frac{1}{(q+1)t^q} \partial_t)) \\ &= \mathcal{D}_{\widehat{K}}/\mathcal{D}_{\widehat{K}} \cdot ((-(-(q+1)t^{q+1})^2 \frac{-(q+1)^{-1}}{(q+1)t^q} \partial_t)^q (-(q+1)t^{q+1} \frac{-(q+1)^{-1}}{(q+1)t^q} \partial_t - 1) + qa) \\ &= \mathcal{D}_{\widehat{K}}/\mathcal{D}_{\widehat{K}} \cdot ((-\frac{-(q+1)}{q+1} t^{2(q+1)-q} \partial_t)^q (\frac{1}{q+1} t \partial_t - 1) + qa) \\ &= \mathcal{D}_{\widehat{K}}/\mathcal{D}_{\widehat{K}} \cdot ((t^{q+2} \partial_t)^q (\frac{1}{q+1} t \partial_t - 1) + qa) \end{aligned}$$

$$= \mathcal{D}_{\widehat{K}}/\mathcal{D}_{\widehat{K}} \cdot ((t^{q+2}\partial_t)^q(t\partial_t - (q+1)) + (q+1)qa)$$

Kommentar: Bei [Sab07]:

Sei $\rho : t \mapsto x := -\frac{t^{q+1}}{qa}$ so ist

$$\begin{aligned} \rho^+ \mathcal{M}_\varphi &= \rho^+ (\mathcal{D}_{\widehat{K}}/\mathcal{D}_{\widehat{K}} \cdot P_\varphi(x, \partial_x)) \\ &= \mathcal{D}_{\widehat{K}}/\mathcal{D}_{\widehat{K}} \cdot (\rho^* P_\varphi(x, \partial_x)) \\ &= \mathcal{D}_{\widehat{K}}/\mathcal{D}_{\widehat{K}} \cdot (P_\varphi(\rho(t), \rho'(t)^{-1} \partial_t)) \\ &= \mathcal{D}_{\widehat{K}}/\mathcal{D}_{\widehat{K}} \cdot (P_\varphi(-\frac{t^{q+1}}{qa}, -\frac{qa}{(q+1)t^q} \partial_t)) \end{aligned}$$

mit

$$\begin{aligned} P_\varphi(-\frac{t^{q+1}}{qa}, -\frac{qa}{(q+1)t^q} \partial_t) &= (-(-\frac{t^{q+1}}{qa})^2 (-\frac{qa}{(q+1)t^q} \partial_t))^q (-\frac{t^{q+1}}{qa} (-\frac{qa}{(q+1)t^q} \partial_t) - 1) + qa \\ &= ((\frac{t^{q+1}}{qa})^2 \frac{qa}{(q+1)t^q} \partial_t)^q (\frac{t^{q+1}}{qa} \frac{qa}{(q+1)t^q} \partial_t - 1) + qa \\ &= (\frac{(t^{q+1})^2}{qa(q+1)t^q} \partial_t)^q (\frac{t^{q+1}}{(q+1)t^q} \partial_t - 1) + qa \\ &= (\frac{t^{2q+2-q}}{qa(q+1)} \partial_t)^q (\frac{t^{q+1-q}}{(q+1)} \partial_t - 1) + qa \\ &= (\frac{t^{q+2}}{qa(q+1)} \partial_t)^q (\frac{1}{(q+1)} t \partial_t - 1) + qa \end{aligned}$$

mit $\mathcal{P}(\rho^+ \mathcal{M}_\varphi) = \{q\} \subset \mathbb{N}$. Definiere mittels $q = \frac{q}{1} =: \frac{\lambda_0}{\lambda_1}$ die Linearform

$$L(s_0, s_1) = \lambda_0 s_0 + \lambda_1 s_1 = q s_0 + s_1.$$

Schreibe $\rho^* P_\varphi = \sum_i \sum_j \alpha_{ij} t^j \partial_t^i$ und berechne die *Determinanten Gleichung* $\sigma_L(\rho^* P_\varphi) \in \widehat{K}[\xi]$.

$$\begin{aligned} \sigma_L(\rho^* P_\varphi) &= \sum_{\{(i,j) \in \mathbb{N} \times \mathbb{Z} \mid L(i,j)=0\}} \alpha_{ij} x^j \xi^i \\ &= \sum_{\{(i,j) \in \mathbb{N} \times \mathbb{Z} \mid (q+1)i-j=0\}} \alpha_{ij} x^j \xi^i \end{aligned}$$

Da $\widehat{K}[\xi]$ kommutativ ist gilt hier, dass $(x^j \xi^i)^k = x^{jk} \xi^{ik}$ ist. Setze $\theta = x^{\lambda_0 + \lambda_1} \xi^{\lambda_1} = x^{q+1} \xi$ so können wir

$$\sigma_L(\rho^* P_\varphi) = \sum_{k \geq 0} \alpha_k \theta^k \quad \alpha_k \in \mathbb{C}$$

schreiben, welches wir als nächsten Schritt faktorisieren

$$\sigma_L(\rho^*P_\varphi) = \varepsilon \prod_{\beta} (\theta - \beta)^{\gamma_\beta}.$$

Wobei $\varepsilon \in \mathbb{C}^\times$ eine Konstante ist. Sei β_0 eine der Nullstellen. Da $\text{ord}_L(\rho^*P_\varphi) = 0$ und der einzige Slope von ρ^*P_φ nicht gleich 0 ist, gilt offensichtlich, dass $\alpha_0 \neq 0$. Also ist 0 keine Nullstelle von $\sigma_L(\rho^*P_\varphi)$.

Kommentar: Setze $R(z) := (\beta_0/(\lambda_0 + 1))z^{\lambda_0+1} = (\beta_0/(q + 1))z^{q+1}$ und betrachte

$$\rho^+\mathcal{M}_\varphi \otimes \mathcal{F}_{\widehat{K}}^R = \mathcal{D}_{\widehat{K}}/\mathcal{D}_{\widehat{K}} \cdot (\rho^*P_\varphi) \otimes \mathcal{F}_{\widehat{K}}^R.$$

Setze $\psi(z) := (\beta_0/(\lambda_0 + 1))z^{\lambda_0+1} = (\beta_0/(q + 1))z^{q+1}$ und betrachte

Kommentar: TODO: bei Hedwig ist es $\beta/\lambda \cdot x^{-\lambda}$

$$\mathcal{N} := \rho^+\mathcal{M}_\varphi \otimes \mathcal{E}_{\widehat{K}}^\psi = \mathcal{D}_{\widehat{K}}/\mathcal{D}_{\widehat{K}} \cdot (\rho^*P_\varphi) \otimes \mathcal{E}_{\widehat{K}}^\psi.$$

Lemma 5.2. Sei e ein zyklischer Vektor zu $\rho^+\mathcal{M}_\varphi$, so ist $e \otimes \underbrace{1}_{\in \widehat{K}} \in \mathcal{N}$ ein zyklischer Vektor für $\mathcal{N} \stackrel{\text{def}}{=} \rho^+\mathcal{M}_\varphi \otimes \mathcal{E}_{\widehat{K}}^\psi$.

Beweis: Es sei e ein zyklischer Vektor von $\rho^+\mathcal{M}_{\varphi_1}$. Da der Grad von ρ^*P_φ gleich $q + 1$ ist, ist auch die Dimension von $\rho^+\mathcal{M}$ gleich $q + 1$. Damit ist auch $\dim_K \mathcal{N} = q + 1$, also reicht zu zeigen, dass $e \otimes 1, \partial_x(e \otimes 1), \partial_x^2(e \otimes 1), \dots, \partial_x^q(e \otimes 1)$ ein linear unabhängiges System ist. Es gilt

$$\begin{aligned} \partial_x(e \otimes 1) &= (\partial_x e) \otimes 1 + x \otimes \partial_x 1 \\ &= (\partial_x e) \otimes 1 + e \otimes \psi'(x) \\ &= (\partial_x e) \otimes 1 + \psi'(x)(e \otimes 1) \\ \partial_x^2(e \otimes 1) &= \partial_x((\partial_x e) \otimes 1 + \psi'(x)(e \otimes 1)) \\ &= (\partial_x^2 e) \otimes 1 + (\partial_x e) \otimes \psi'(x) + \psi''(x)(e \otimes 1) + \psi'(x)((\partial_x e) \otimes 1 + e \otimes \psi'(x)) \\ &= (\partial_x^2 e) \otimes 1 + \psi'(x)(\partial_x e) \otimes 1 + \psi''(x)(e \otimes 1) + \psi'(x)(\partial_x e) \otimes 1 + \psi'(x)^2(e \otimes 1) \\ &= (\partial_x^2 e) \otimes 1 + 2\psi'(x)(\partial_x e) \otimes 1 + (\psi''(x) + \psi'(x)^2)(e \otimes 1) \\ &\vdots \\ \partial_x^q(e \otimes 1) &= (\partial_x^q e) \otimes 1 + \lambda_{q-1}(\partial_x^{q-1} e) \otimes 1 + \dots + \lambda_1(\partial_x e) \otimes 1 + \lambda_0(e \otimes 1) \end{aligned}$$

und somit ist dann

$$\begin{pmatrix} e \otimes 1 \\ \partial_x(e \otimes 1) \\ \partial_x^2(e \otimes 1) \\ \vdots \\ \partial_x^{q-1}(e \otimes 1) \\ \partial_x^q(e \otimes 1) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & \cdots & \cdots & \cdots & 0 \\ \psi'(x) & 1 & 0 & & & \vdots \\ \star & \star & 1 & 0 & & \vdots \\ \vdots & & \ddots & \ddots & \ddots & \vdots \\ \star & \cdots & \cdots & \star & 1 & 0 \\ \lambda_0 & \lambda_1 & \cdots & \cdots & \lambda_{q-1} & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} e \otimes 1 \\ (\partial_x e) \otimes 1 \\ (\partial_x^2 e) \otimes 1 \\ \vdots \\ (\partial_x^{q-1} e) \otimes 1 \\ (\partial_x^q e) \otimes 1 \end{pmatrix}$$

Da bekanntlich $e \otimes 1, (\partial_x e) \otimes 1, (\partial_x^2 e) \otimes 1, \dots, (\partial_x^q e) \otimes 1$ linear unabhängig sind, gilt dies auch für $e \otimes 1, \partial_x(e \otimes 1), \partial_x^2(e \otimes 1), \dots, \partial_x^q(e \otimes 1)$. Damit folgt die Behauptung. ■

Kommentar:

Lemma 5.3. [*Hei10*, Seite 44] Wenn $\rho^+ \mathcal{M}_\varphi = \mathcal{D}_{\widehat{K}} / \mathcal{D}_{\widehat{K}} \cdot (\rho^* P_\varphi(x, \partial_x))$ gilt, so ist

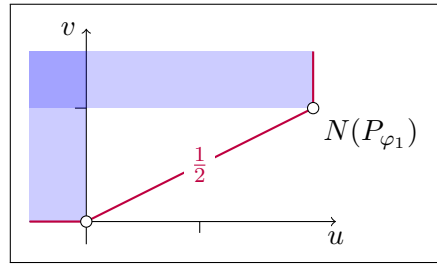
$$\begin{aligned} \mathcal{N} &\stackrel{\text{def}}{=} \rho^+ \mathcal{M}_\varphi \otimes \mathcal{E}_{\widehat{K}}^\psi = \mathcal{D}_{\widehat{K}} / \mathcal{D}_{\widehat{K}} \cdot (\rho^* P_\varphi(x, \partial_x + \frac{\beta}{x^{\lambda+1}})) \\ &= \mathcal{D}_{\widehat{K}} / \mathcal{D}_{\widehat{K}} \cdot (\rho^* P_\varphi(x, \partial_x + \frac{\beta}{x^{\lambda+1}})) \end{aligned}$$

5.2 Spezialfall $\varphi_1 := \frac{a}{x}$

Als konkreten Fall betrachten wir nun \mathcal{M}_{φ_1} bezüglich $\varphi_1 := \frac{a}{x}$. Es ist das Minimalpolynom gegeben durch

$$\begin{aligned} P_{\varphi_1}(x, \partial_x) &= -x^2 \partial_x (x \partial_x - 1) + a \\ &= -x^2 \underbrace{\partial_x x \partial_x}_{= \partial_x^2} + x^2 \partial_x + a \\ &= -x^2 \underbrace{(x \partial_x + 1) \partial_x}_{= \partial_x^2} + x^2 \partial_x + a \\ &= -x^3 \partial_x^2 - x^2 \partial_x + x^2 \partial_x + a \\ &= -x^3 \partial_x^2 + a \end{aligned}$$

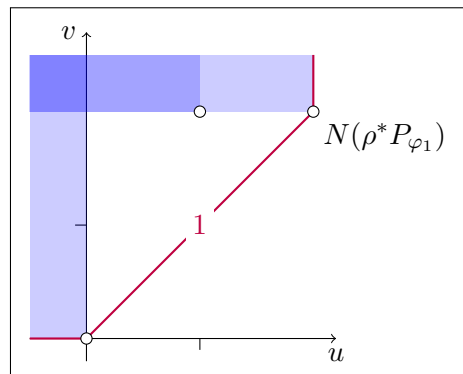
Erhalte nun das Newton-Polygon mit den Slopes $\mathcal{P}(\mathcal{M}_{\varphi_1}) = \{\frac{1}{2}\}$.

Abbildung 5.1: Newton Polygon zu P_{φ_1}


Berechne nun zu $\rho : t \mapsto x := -2t^2$ ein Minimalpolynom $\rho^*P_{\varphi_1}$ zu $\rho^+\mathcal{M}_{\varphi_1}$:

$$\begin{aligned}
 \rho^*P_{\varphi_1}(x, \partial_x) &= t^3 \partial_t(t \partial_t - 2) + 2a \\
 &= t^3 \partial_t t \partial_t - 2t^3 \partial_t + 2a \\
 &= t^3 \overbrace{(t \partial_t + 1)} \partial_t - 2t^3 \partial_t + 2a \\
 &= t^4 \partial_t^2 + t^3 \partial_t - 2t^3 \partial_t + 2a \\
 &= t^4 \partial_t^2 - t^3 \partial_t + 2a
 \end{aligned}$$

und erhalte einen Meromorphen Zusammenhang $\rho^+\mathcal{M}_{\varphi_1} = \mathcal{D}_{\widehat{K}}/\mathcal{D}_{\widehat{K}} \cdot \rho^*P_{\varphi_1}$ mit genau dem Slope $1 = \frac{1}{1} =: \frac{\lambda_0}{\lambda_1}$.

 Abbildung 5.2: Newton Polygon zu $\rho^*P_{\varphi_1}$


Definiere die Linearform $L(s_0, s_1) := \lambda_0 s_0 + \lambda_1 s_1 = s_0 + s_1$. Berechne nun die *Determinanten Gleichung* $\sigma_L(\rho^*P_{\varphi_1}) \in \widehat{K}[\xi]$ von $\rho^*P_{\varphi_1}$.

$$\sigma_L(\rho^*P_{\varphi_1}) = \sum_{\{(i,j) | 2i-j=0\}} \alpha_{ij} x^j \xi^i$$

$$= x^4 \xi^2 + 2a$$

Setze $\theta := x^{\lambda_0 + \lambda_1} \xi^{\lambda_1} = x^2 \xi$ so erhalten wir

$$\sigma_L(\rho^* P_{\varphi_1}) = \theta^2 + 2a$$

schreiben, welches wir als nächstes faktorisieren

$$\begin{aligned} \sigma_L(\rho^* P_{\varphi_1}) &= \theta^2 + 2a \\ &= (\theta - \underbrace{i\sqrt{2a}}_{=: \beta_0})(\theta + i\sqrt{2a}) \end{aligned}$$

Setze $\psi(x) := (\beta_0/(\lambda_0 + 1))x^{\lambda_0 + 1} = i\sqrt{2a}x^2$ und betrachte $\mathcal{N} := \rho^+ \mathcal{M}_{\varphi_1} \otimes \mathcal{E}_{\hat{K}}^\psi$ mit dem zyklischem Vektor $e \otimes 1$, wobei e ein zyklischer Vektor von $\rho^+ \mathcal{M}$ ist. Es existieren $a_0(t)$ und $a_1(t)$ in K , so dass

$$0 = \partial_t^2(e \otimes 1) + a_1(t)\partial_t(e \otimes 1) + a_0(t)e \otimes 1$$

und damit ist dann $\mathcal{N} = \mathcal{D}/\mathcal{D} \cdot (\partial_t^2 + a_1(t)\partial_t + a_0(t))$.

Kommentar:

$$\begin{aligned} 0 &= \left(\frac{1}{2}t^4\partial_t^2 - \frac{1}{2}t^3\partial_t + a\right)e \\ 0 &= (\partial_t^2 - t^{-1}\partial_t + 2t^{-4}a)e \\ \partial_t^2 e &= (t^{-1}\partial_t - 2t^{-4}a)e \end{aligned}$$

Kommentar: Es ist

$$\begin{aligned} \partial_t(e \otimes 1) &= (\partial_t e) \otimes 1 + e \otimes \psi'(t) \\ &= (\partial_t e) \otimes 1 + \underbrace{\psi'(t) e \otimes 1}_{\substack{\text{---} \\ \text{---} \\ \text{---}}} \\ &= (\partial_t e) \otimes 1 + 2i\sqrt{2a}t e \otimes 1 \\ \partial_t^2(e \otimes 1) &= \partial_t(\partial_t(e \otimes 1)) \\ &= \partial_t((\partial_t e) \otimes 1 + e \otimes \psi'(t)) \\ &= \underbrace{(\partial_t^2 e) \otimes 1}_{\substack{\text{---} \\ \text{---}}} + \underbrace{(\partial_t e) \otimes \psi'(t) + (\partial_t e) \otimes \psi'(t)}_{\substack{\text{---} \\ \text{---}}} + e \otimes \underbrace{((\partial_t + \psi'(t))\psi'(t))}_{\substack{\text{---} \\ \text{---} \\ \in K}} \\ &= \underbrace{((t^{-1}\partial_t - 2at^{-4})e) \otimes 1}_{\substack{\text{---} \\ \text{---}}} + \underbrace{2\psi'(t)(\partial_t e) \otimes 1}_{\substack{\text{---} \\ \text{---}}} + (\psi''(t) + \psi'(t)^2)e \otimes 1 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 &= t^{-1}(\partial_t e) \otimes 1 - 2at^{-4}e \otimes 1 + 2\psi'(t)(\partial_t e) \otimes 1 + (\psi''(t) + \psi'(t)^2)e \otimes 1 \\
 &= (t^{-1} + 2\psi'(t)) \underbrace{(\partial_t e) \otimes 1}_{=0} + (-2at^{-4} + \psi''(t) + \psi'(t)^2)e \otimes 1 \\
 &= (t^{-1} + 2\psi'(t)) \underbrace{(\partial_t(e \otimes 1) - e \otimes \psi'(t))}_{=0} + (-2at^{-4} + \psi''(t) + \psi'(t)^2)e \otimes 1 \\
 &= (t^{-1} + 2\psi'(t))\partial_t(e \otimes 1) + (-t^{-1}\psi'(t) - 2\psi'(t)^2 - 2at^{-4} + \psi''(t) + \psi'(t)^2)e \otimes 1 \\
 &= (t^{-1} + 2\psi'(t))\partial_t(e \otimes 1) + (\psi''(t) - t^{-1}\psi'(t) - 2at^{-4} - \psi'(t)^2)e \otimes 1 \\
 &= (t^{-1} + 4i\sqrt{2at})\partial_t(e \otimes 1) + \underbrace{(2i\sqrt{2a} - t^{-1}2i\sqrt{2at} - 2at^{-4} - (2i\sqrt{2at})^2)}_{=0}e \otimes 1 \\
 &= (t^{-1} + 4i\sqrt{2at})\partial_t(e \otimes 1) + (-2at^{-4} + 8iat^2)e \otimes 1
 \end{aligned}$$

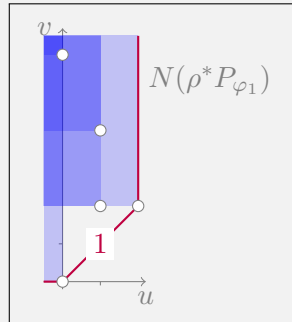
Also gilt

$$0 = \left(\partial_t^2 - (t^{-1} + 4i\sqrt{2at})\partial_t + (2at^{-4} - 8iat^2) \right) e \otimes 1$$

beziehungsweise gilt

$$0 = \left(t^4 \partial_t^2 - (t^3 + 4i\sqrt{2at^5})\partial_t + (2a - 8iat^6) \right) e \otimes 1$$

Abbildung 5.3: Newton Polygon zu \mathcal{N}



Es ist

$$\begin{aligned}
 \partial_t(e \otimes 1) &= (\partial_t e) \otimes 1 + e \otimes \psi'(t) \\
 &= (\partial_t e) \otimes 1 + \underbrace{\psi'(t)}_{=0} e \otimes 1 \\
 \partial_t^2(e \otimes 1) &= \partial_t(\underbrace{\partial_t(e \otimes 1)}_{=0})
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 &= \partial_t(\overbrace{(\partial_t e) \otimes 1 + e \otimes \psi'(t)}) \\
 &= \underbrace{(\partial_t^2 e) \otimes 1} + \underbrace{(\partial_t e) \otimes \psi'(t) + (\partial_t e) \otimes \psi'(t)}_{\in K} + e \otimes \underbrace{((\partial_t + \psi'(t))\psi'(t))}_{\in K} \\
 &= \overbrace{((t^{-1}\partial_t - 2at^{-4})e) \otimes 1} + \overbrace{2\psi'(t)(\partial_t e) \otimes 1} + \overbrace{(\partial_t \psi'(t) + \psi'(t)^2)e \otimes 1} \\
 &= \overbrace{((t^{-1}\partial_t - 2at^{-4})e) \otimes 1} + \overbrace{2\psi'(t)(\partial_t e) \otimes 1} + \overbrace{(\psi'(t)\partial_t + \psi''(t) + \psi'(t)^2)e \otimes 1} \\
 &= \overbrace{(t^{-1}\partial_t e) \otimes 1 - (2at^{-4})e \otimes 1} + \overbrace{2\psi'(t)(\partial_t e) \otimes 1} \\
 &\quad + \overbrace{(\psi'(t)\partial_t e) \otimes 1 + \psi''(t)e \otimes 1 + \psi'(t)^2 e \otimes 1} \\
 &= (t^{-1} + 2\psi'(t) + \psi'(t)) \underbrace{(\partial_t e) \otimes 1} + \underbrace{(-2at^{-4} + \psi''(t) + \psi'(t)^2)e \otimes 1} \\
 &= (t^{-1} + 3\psi'(t)) \underbrace{(\partial_t(e \otimes 1) - e \otimes \psi'(t))} \\
 &\quad + \underbrace{(-2at^{-4} + \psi''(t) + \psi'(t)^2)e \otimes 1} \\
 &= (t^{-1} + 3\psi'(t))\partial_t(e \otimes 1) - \underbrace{(t^{-1}\psi'(t) + 3\psi'(t)^2)e \otimes 1} \\
 &\quad + \underbrace{(-2at^{-4} + \psi''(t) + \psi'(t)^2)e \otimes 1} \\
 &= \left((t^{-1} + 3\psi'(t))\partial_t - t^{-1}\psi'(t) - 3\psi'(t)^2 - 2at^{-4} + \psi''(t) + \psi'(t)^2 \right) e \otimes 1 \\
 &= \left((t^{-1} + 3\psi'(t))\partial_t - t^{-1}\psi'(t) - 2at^{-4} + \psi''(t) - 2\psi'(t)^2 \right) e \otimes 1
 \end{aligned}$$

also

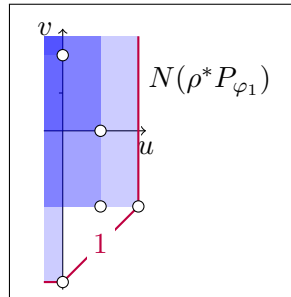
$$0 = \left(\partial_t^2 - (t^{-1} + 3\psi'(t))\partial_t + t^{-1}\psi'(t) + 2at^{-4} - \psi''(t) + 2\psi'(t)^2 \right) e \otimes 1$$

Versuch 1 (wie [Sab90])

und somit mit $\psi(t) = i\sqrt{2at^2}$ ist $\psi'(t) = 2i\sqrt{2at}$ und $\psi''(t) = 2i\sqrt{2a}$. Also

$$\begin{aligned}
 0 &= \left(\partial_t^2 - (t^{-1} + 3\psi'(t))\partial_t + t^{-1}\psi'(t) + 2at^{-4} - \psi''(t) + 2\psi'(t)^2 \right) e \otimes 1 \\
 &= \left(\partial_t^2 - (t^{-1} + 6i\sqrt{2at})\partial_t + \underbrace{t^{-1}2i\sqrt{2at}} + \underbrace{2at^{-4} - 2i\sqrt{2a} + 2(2i\sqrt{2at})^2}_{-8(2a)t^2} \right) e \otimes 1 \\
 &= \left(\partial_t^2 - (t^{-1} + 6i\sqrt{2at})\partial_t + \underbrace{2i\sqrt{2a}} + \underbrace{2at^{-4} - 2i\sqrt{2a} - 8(2a)t^2}_{-16at^2} \right) e \otimes 1 \\
 &= \left(\partial_t^2 - (t^{-1} + 6i\sqrt{2at})\partial_t + 2at^{-4} - 16at^2 \right) e \otimes 1
 \end{aligned}$$

Abbildung 5.4: Newton Polygon zu \mathcal{N}



Kommentar: Hier entsteht KEIN regulären anteil, es gibt noch nicht mal einen zweiten Slope.

Versuch 2 (wie [Hei10])

und somit mit $\psi(t) = \frac{\beta}{\lambda} t^{-\lambda}$ ist $\psi'(t) = -\beta t^{-(\lambda+1)}$ und $\psi''(t) = (\lambda+1)\beta t^{-(\lambda+2)}$. Also

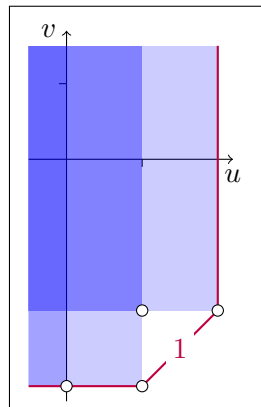
$$\begin{aligned}
 0 &= \left(\partial_t^2 - (t^{-1} + \underbrace{3\psi'(t)}) \partial_t + \underbrace{t^{-1}\psi'(t)} + 2at^{-4} - \underbrace{\psi''(t)} + \underbrace{2\psi'(t)^2} \right) e \otimes 1 \\
 &= \left(\partial_t^2 - (t^{-1} - \underbrace{3\beta t^{-(\lambda+1)}}) \partial_t - \underbrace{t^{-1}\beta t^{-(\lambda+1)}} + 2at^{-4} - \underbrace{(\lambda+1)\beta t^{-(\lambda+2)}} + \underbrace{2(-\beta t^{-(\lambda+1)})^2} \right) e \otimes 1 \\
 &= \left(\partial_t^2 - (t^{-1} - 3\beta t^{-(\lambda+1)}) \partial_t - \beta t^{-(\lambda+2)} + 2at^{-4} - (\lambda+1)\beta t^{-(\lambda+2)} + 2\beta^2 t^{-2(\lambda+1)} \right) e \otimes 1 \\
 &= \left(\partial_t^2 - (t^{-1} - 3\beta t^{-(\lambda+1)}) \partial_t + 2at^{-4} - (\lambda+2)\beta t^{-(\lambda+2)} + 2\beta^2 t^{-2(\lambda+1)} \right) e \otimes 1
 \end{aligned}$$

Setze nun $\beta := i\sqrt{a}$ und $\lambda := 1$, um einen regulären anteil zu bekommen.

$$\begin{aligned}
 0 &= \left(\partial_t^2 - (t^{-1} - 3\beta t^{-(\lambda+1)}) \partial_t + 2at^{-4} - (\lambda+2)\beta t^{-(\lambda+2)} + 2\beta^2 t^{-2(\lambda+1)} \right) e \otimes 1 \\
 &= \left(\partial_t^2 - (t^{-1} - 3i\sqrt{a}t^{-2}) \partial_t + 2at^{-4} - 3i\sqrt{a}t^{-3} - 2at^{-4} \right) e \otimes 1 \\
 &= \left(\partial_t^2 - (t^{-1} - 3i\sqrt{a}t^{-2}) \partial_t - 3i\sqrt{a}t^{-3} \right) e \otimes 1
 \end{aligned}$$

somit ist das Newton Polygon

Abbildung 5.5: Newton Polygon zu \mathcal{N}



5.2.1 Sabah's refined Levelt-Turrittin-Zerlegung für φ_1

B Genaueres zu $(x^2 \partial_x)^k$

Nun wollen wir noch $(x^2 \partial_x)^{k+1}$ besser verstehen.

$$\begin{aligned}
 (x^2 \partial_x)^{k+1} &= x^2 \overbrace{\partial_x x^2 \partial_x}^{(x^2 \partial_x)^2} (x^2 \partial_x)^{k-1} \\
 &= x^2 \overbrace{(2x + x^2 \partial_x)}^{(x^2 \partial_x)^2} \partial_x (x^2 \partial_x)^{k-1} \\
 &= (2x^3 \partial_x + x^4 \partial_x^2) (x^2 \partial_x)^{k-1} \\
 &= (2x^3 \partial_x + x^4 \partial_x^2) (x^2 \partial_x) (x^2 \partial_x)^{k-2} \\
 &= (2x^3 \overbrace{\partial_x x^2 \partial_x}^{(x^2 \partial_x)^2} + x^4 \overbrace{\partial_x^2 x^2 \partial_x}^{(x^2 \partial_x)^3}) (x^2 \partial_x)^{k-2} \\
 &= (2x^3 \overbrace{(2x + x^2 \partial_x) \partial_x}^{(x^2 \partial_x)^2} + x^4 \overbrace{(2x \partial_x + 1 + x^2 \partial_x^2) \partial_x}^{(x^2 \partial_x)^3}) (x^2 \partial_x)^{k-2} \\
 &= (4x^4 \partial_x + 2x^5 \partial_x^2 + 2x^5 \partial_x^2 + x^4 \partial_x + x^6 \partial_x^3) (x^2 \partial_x)^{k-2} \\
 &= (5x^4 \partial_x + 4x^5 \partial_x^2 + x^6 \partial_x^3) (x^2 \partial_x)^{k-2} \\
 &= \sum_{n=1}^{k+1} \binom{k}{n-1} \frac{(k+1)!}{n!} x^{n+k} \partial_x^n
 \end{aligned}$$

Kommentar: Stirlingzahlen

also gilt für spezielle k

$$(x^2 \partial_x)^{k+1} = \begin{cases} 2x^3 \partial_x + x^4 \partial_x^2 & \text{falls } k = 1 \\ 5x^4 \partial_x + 4x^5 \partial_x^2 + x^6 \partial_x^3 & \text{falls } k = 2 \\ \sum_{n=1}^{k+1} \binom{k}{n-1} \frac{(k+1)!}{n!} x^{n+k} \partial_x^n & \text{allgemein} \end{cases} \quad (\text{B.1})$$

Literaturverzeichnis

- [Ara] D. Arapura, *Notes on d -modules and connections with hodge theory*, Notizen?
- [Ark12] S. Arkhipov, *D -modules*, unpublished lecture notes available online, May 2012.
- [AV09] B. Alkofer and F. Vogl, *Lineare differentialgleichungen und deren fouriertransformierte aus algebraischer sicht / lineare differentialgleichungen aus algebraischer sicht*, 2009.
- [Ayo09] J. Ayoub, *Introduction to algebraic d -modules*, Vorlesungsskript, 2009.
- [BD04] A. Beilinson and V.G. Drinfeld, *Chiral algebras*, Colloquium Publications - American Mathematical Society, no. Bd. 51, American Mathematical Society, 2004.
- [Blo04] Spencer Bloch, *Local fourier transforms and rigidity for d -modules*, Asian J. Math (2004), 587–605.
- [Cou95] S.C. Coutinho, *A primer of algebraic d -modules*, London Mathematical Society Student Texts, Cambridge University Press, 1995.
- [Ell10] C. Elliott, *D -modules*, unpublished notes available online, April 2010.
- [Gin98] V. Ginzburg, *Lectures on d -modules*, Vorlesungsskript, 1998.
- [GL04] Ricardo García López, *Microlocalization and stationary phase*, Asian J. Math. **8** (2004), no. 4, 747–768. MR MR2127946 (2005m:32014)
- [Har77] R. Hartshorne, *Algebraic geometry*, Graduate Texts in Mathematics, Springer, 1977.
- [Hei10] Hedwig Heizinger, *Verschwindungszykel regulär singulärer D -Moduln und Fourier-transformation*, 2010.
- [HTT07] R. Hotta, K. Takeuchi, and T. Tanisaki, *D -modules, perverse sheaves, and representation theory*, Progress in Mathematics, Birkhäuser Boston, 2007.
- [Kas03] M. Kashiwara, *D -modules and microlocal calculus*, Translations of Mathematical Monographs, American Mathematical Society, 2003.

- [MR89] H. Matsumura and M. Reid, *Commutative ring theory*, Cambridge Studies in Advanced Mathematics, Cambridge University Press, 1989.
- [Sab90] C. Sabbah, *Introduction to algebraic theory of linear systems of differential equations*, Vorlesungsskript, 1990.
- [Sab07] ———, *An explicit stationary phase formula for the local formal Fourier-Laplace transform*, June 2007.
- [Sch] J.P. Schneiders, *An introduction to d -modules*.
- [Sta12] The Stacks Project Authors, *Stacks Project*, <http://stacks.math.columbia.edu>, December 2012.

Kommentar: TODO: Erklärung das das wirklich selbstgemacht ist