

# Komplex Präparat - Synthese und Phosphoreszenz von $[\text{Re}(\text{CO})_3\text{Cl}(\text{N}_2\text{Tz})]$

Protokoll zum Versuch des AC2 Praktikums von  
**Vincent Kümmerle & Elvis Gnaglo**

Universität Stuttgart

Verfasser: Vincent Kümmerle, 3712667  
st187541@stud.uni-stuttgart.de

Elvis Gnaglo, 3710504  
st189318@stud.uni-stuttgart.de

Gruppennummer: A05

Versuchszeitraum: 29.10.2025 - 19.11.2025

Assistent: Manuel Pech

Abgabenummer: 1. Abgabe

Stuttgart, den 22. November 2025

# Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Einleitung</b>	<b>1</b>
1.1	Syntheseweg . . . . .	1
<b>2</b>	<b>Ergebnisse und Diskussion</b>	<b>3</b>
2.1	$^1\text{H}$ -NMR . . . . .	3
2.2	UV/Vis . . . . .	5
2.3	Photolumineszenz . . . . .	5
<b>3</b>	<b>Experimenteller Teil</b>	<b>7</b>
3.1	Methoden und Geräte . . . . .	7
3.1.1	UV/Vis Spektroskopie . . . . .	7
3.1.2	Fluoreszenzspektrometrie . . . . .	7
3.2	Synthesen . . . . .	8
3.2.1	3-Methyl-6-(pyrimidin-2-yl)-1,2,4,5-tetrazin ( $\text{N}_2\text{-Tz}$ ) . . . . .	8
3.2.2	$[\text{Re}(\text{CO})_3\text{Cl}(\text{N}_2\text{Tz})]$ . . . . .	8
3.2.3	$[\text{Re}(\text{CO})_3\text{Cl}(4,5\text{-BCN-3-(2-pyrimidyl)-6-methylpyridazin})]$ . . . . .	8
<b>4</b>	<b>Zusammenfassung</b>	<b>8</b>
<b>5</b>	<b>Literatur</b>	<b>8</b>

# 1 Einleitung

Tetrazine als Klasse heterocyclischer Liganden sind bereits seit der Synthese von A. Pinner 1893 bekannt<sup>[1]</sup> und sind aufgrund ihrer starken  $\pi$ -Akzeptorfunktion von Bedeutung für die Koordination an Übergangsmetallkomplexe und Klick-Reaktionen. Durch die vier elektronegativen Stickstoffatome weisen Tetrazine ein sehr elektronenarmes aromatisches System mit energetisch sehr tief liegenden  $\pi^*$ -Molekülorbitalen auf, die energiearme  $n \rightarrow \pi^*$  Übergänge mit charakteristischer Absorption ermöglichen.<sup>[2]</sup> Deshalb sind Tetrazine sehr leicht reduzierbar und erscheinen sehr oft pink. Tetrazine können durch die Interaktion der tief liegenden  $\pi^*$ -Molekülorbitale (LUMOs) mit den HOMOs (Lowest/Highest Occupied Molecular Orbitals) eines Diens Diels-Alder-Reaktionen mit inversem Elektronenbedarf (invers Electron Demand Diels Alder, iEDDA) eingehen, die auch als Klick-Reaktionen bezeichnet werden. Zudem sind die  $\pi^*$ -MOs Zielorbitale für Metal-Ligand-Charge-Transfers (MLCT). Durch die Koordination von Tetrazin-Derivaten an Übergangsmetalle wie Rhenium bilden sich Komplexe mit höherer Komplexstabilität, da die Derivate als mehrzählige Liganden Chelat-Komplexe ausbilden. Häufig wird hierfür Pentacarbonylrhenium(I)chlorid verwendet, in dem die Carbonyl-Liganden als  $\pi$ -Akzeptoren und der Chlorid-Ligand als  $\sigma$ -Donor oktaedrisch um das  $d_6$ -System des Rheniums koordiniert sind. Die hierbei entstehenden Komplexe der Art  $[\text{Re}(\text{CO})_3\text{Cl}(\text{L}_x)]$  finden Anwendung als Photosensibilisatoren, Katalysatoren für die elektrochemische Reduktion von  $\text{CO}_2$  zu CO und in der Biodiagnostik, da sie bioorthogonal sind und damit *in vivo* genutzt werden können.

Somit ist das Ziel des Versuchs im ersten Teil 3-Methyl-6-(pyrimidin-2-yl)-1,2,4,5-tetrazin ( $\text{N}_2\text{-Tz}$ ) und ausgehend davon  $[\text{Re}(\text{CO})_3\text{Cl}(\text{N}_2\text{Tz})]$  zu synthetisieren. Im zweiten Teil wird eine iEDDA-Reaktion mit  $[\text{Re}(\text{CO})_3\text{Cl}(\text{N}_2\text{Tz})]$  durchgeführt und die Phosphoreszenz des *fac*- $\text{Re}(\text{CO})_3\text{Cl}$ -Komplexes untersucht.

## 1.1 Syntheseweg

Die erste Stufe der Synthese von  $[\text{Re}(\text{CO})_3\text{Cl}(\text{N}_2\text{Tz})]$  wurde nach der Vorschrift von Schnierle et al. durch eine modifizierte Pinner Synthese durchgeführt.<sup>[3],[4]</sup> Wie der Syntheseweg in Abbildung 1 zeigt, wird elementarer Schwefel als aktivierende Spezies verwendet, um die Nucleophilie des Hydraziniumhydroxids zu erhöhen und somit den Angriff des Stickstoff-Elektronenpaares an der Carbonitrilgruppe zu erleichtern. Durch einen weiteren nucleophilen Angriff an der Nitrilgruppe des Acetonitrils wird das Sechsring-System des Dihydotetrazins gebildet.

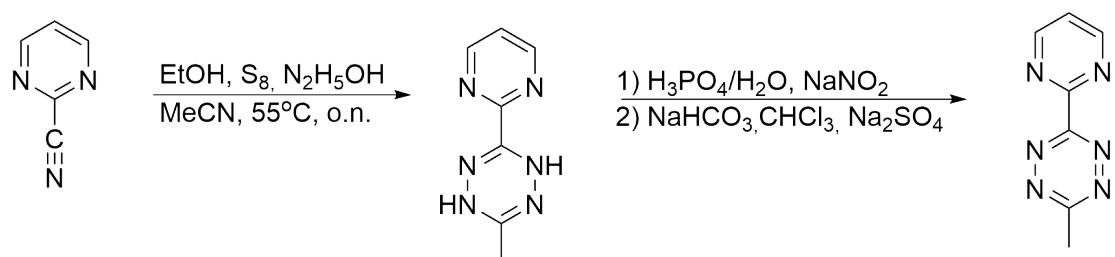


Abb. 1: Syntheseweg der Synthese von 3-Methyl-6-(pyrimidin-2-yl)-1,2,4,5-tetrazin (N<sub>2</sub>-Tz) ausgehend von 2-Cyanopyrimidin.<sup>[4]</sup>

In der zweiten Stufe wurde das Dihydrotetrazin im sauren Milieu mit NaNO<sub>2</sub> oxidiert und nach Neutralisation mit Chloroform extrahiert, um das 3-Methyl-6-(pyrimidin-2-yl)-1,2,4,5-tetrazin (N<sub>2</sub>-Tz) zu synthetisieren. Die dritte und vierte Stufe wurden nach dem Syntheseweg, der in Abbildung 2 abgebildet ist, durchgeführt.

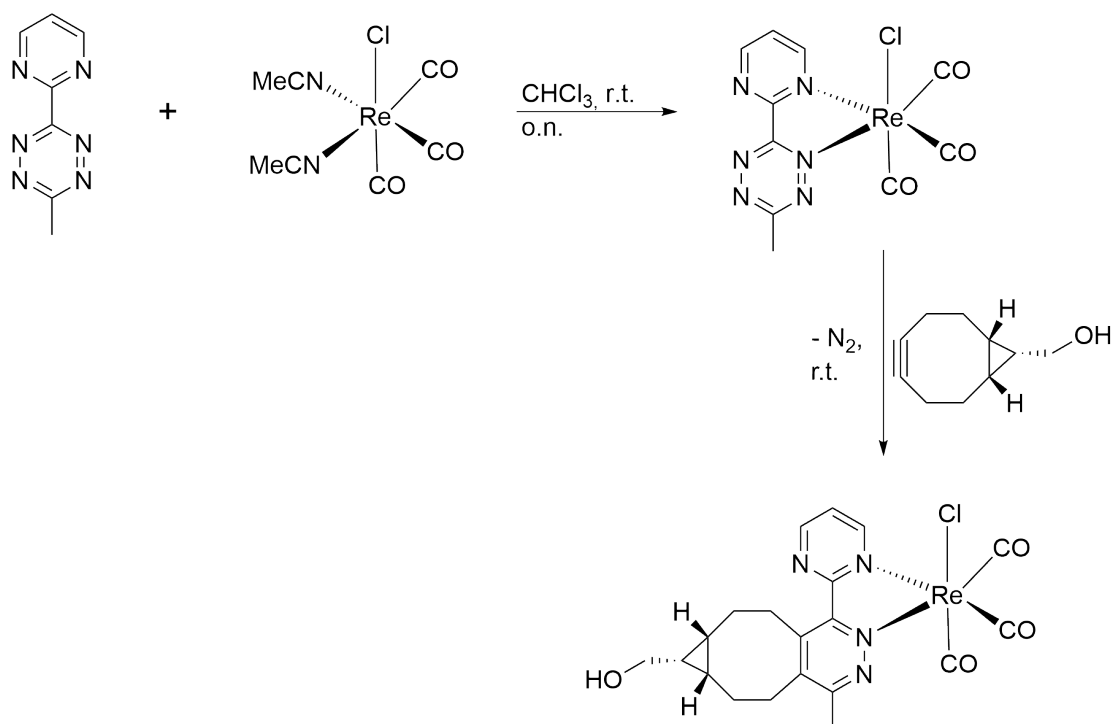


Abb. 2: Syntheseweg der Synthese von [Re(CO)<sub>3</sub>Cl(4,5-BCN-3-(2-pyrimidyl)-6-methylpyridazin)] ausgehend von N<sub>2</sub>-Tz und [Re(MeCN)<sub>2</sub>(CO)<sub>3</sub>Cl].<sup>[5]</sup>

Dabei wurde zuerst das N<sub>2</sub>-Tz mit [Re(MeCN)<sub>2</sub>(CO)<sub>3</sub>Cl] an Rhenium komplexiert und somit [Re(CO)<sub>3</sub>Cl(N<sub>2</sub>Tz)] synthetisiert. In der vierten Stufe wurde aus dem Rhenium-Komplex und Bicyclononin (BCN) über eine iEDDA-Reaktion [Re(CO)<sub>3</sub>Cl-(4,5-BCN-3-(2-pyrimidyl)-6-methylpyridazin)] synthetisiert.

## 2 Ergebnisse und Diskussion

### 2.1 <sup>1</sup>H-NMR

Die Abbildung 3 zeigt das <sup>1</sup>H-NMR Spektrum des synthetisierten 3-Methyl-6-(pyrimidin-2-yl)-1,2,4,5-tetrazins.

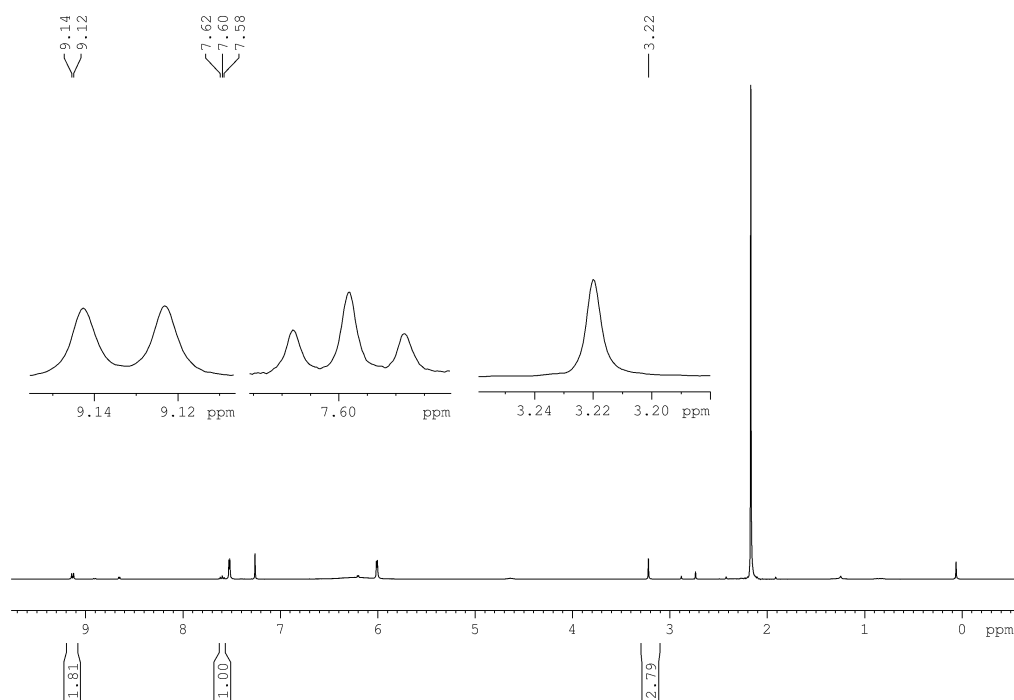


Abb. 3: In CDCl<sub>3</sub> aufgenommenes <sup>1</sup>H-NMR Spektrum von 3-Methyl-6-(pyrimidin-2-yl)-1,2,4,5-tetrazin (N<sub>2</sub>-Tz).

Ausgehend von der in Abbildung 1 gezeigten Struktur des Tetrazins lassen sich die Signale wie folgt zuordnen: Das Dublett bei 9,11 ppm mit einem Integral von

2H lässt sich den beiden aromatischen Wasserstoffatome im Pyrimidinringe an Position 4 und 6 zuordnen, da diese über eine  $^3J_{\text{H-H}}$ -Kopplung zum Wasserstoffatom an Position 5 koppeln ( $^4J_{\text{H-H}} = 5 \text{ Hz}$ ). Das Triplett bei 7,60 ppm (1H) kann dementsprechend dem Wasserstoffatom an Position 5 im Pyrimidinring zugeordnet werden, da es über eine  $^3J_{\text{H-H}}$ -Kopplung von 5 Hz zu den anderen beiden Wasserstoffatome koppelt. Das Singulett bei 3,22 ppm mit einem Integral von 3H lässt sich den Wasserstoffatome der Methylgruppe an Position 3 im Tetrazinring zuweisen. Die Tieffeldverschiebung der Signal befindet sich im Bereich der Literaturwerte, wobei I. Löw in  $\text{CD}_3\text{CN}$  folgende Werte gemessen hat:  $\delta [\text{ppm}] = 9.08 \text{ (d, 2H, C-H-4, 6, } J = 5.0 \text{ Hz)}$ ,  $7.66 \text{ (t, 1H, C-H-5, } J = 5.0 \text{ Hz)}$ ,  $3.09 \text{ (s, 3H, CH}_3\text{)}$ .<sup>[2]</sup> Die weiteren Signale in Abbildung 3 stammen von anderen Produkten der Reaktion wie dem 3,6-Dimethyltetrazin, die nicht durch Säulenchromatographie abgetrennt werden konnten, sowie von Verunreinigungen. So ist das Signal bei 2,1 ppm auf Acetonitril und das bei 0,0 ppm auf Polysiloxan Schliff Fett zurückzuführen.

## 2.2 UV/Vis

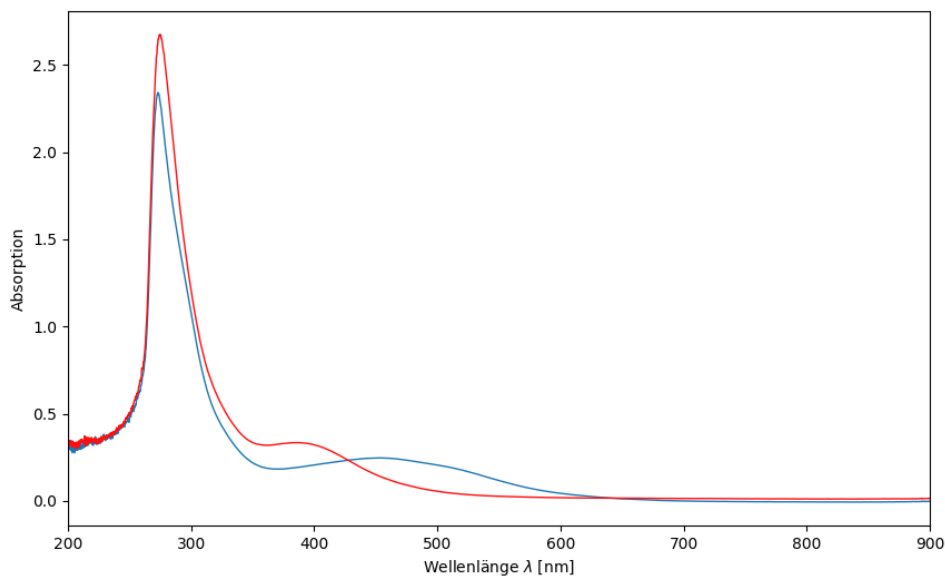


Abb. 4: UV/Vis-Spektren von  $[\text{Re}(\text{CO})_3\text{Cl}(\text{N}_2\text{Tz})]$  (blau) und von  $[\text{Re}(\text{CO})_3\text{Cl}(4,5\text{-BCN-3-(2-pyrimidyl)-6-methylpyridazin})]$  (rot) zwischen 200 und 900 nm, gemessen in  $\text{CH}_3\text{CN}$ .

## 2.3 Photolumineszenz

Durch die iEDDA-Reaktion mit Bicyclononin wird die Elektronendichte im Ring vom Tetrazin zum Pyridazin erhöht, wodurch die  $^3\text{MLCT}$  Phosphoreszenz aktiviert wird. Dies lässt sich in den gemessenen Photolumineszenz-Spektren in Abbildung 5 erkennen.

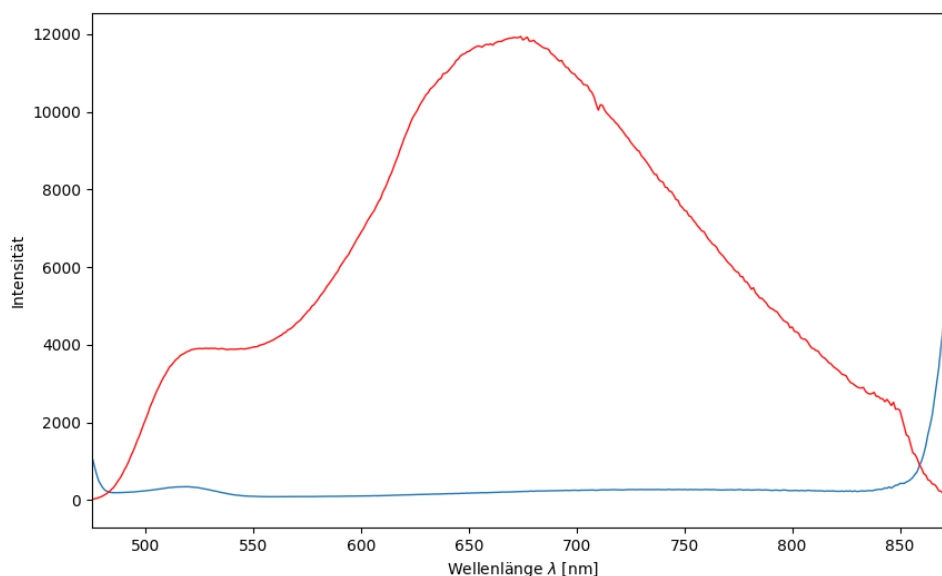


Abb. 5: Photolumineszenz-Spektren von  $[\text{Re}(\text{CO})_3\text{Cl}(\text{N}_2\text{Tz})]$  (blau) und von  $[\text{Re}(\text{CO})_3\text{Cl}(4,5\text{-BCN-3-(2-pyrimidyl)-6-methylpyridazin})]$  (rot) zwischen 475 und 875 nm, gemessen in  $\text{CH}_3\text{CN}$ .

Die Intensität der Phosphoreszenz nimmt vom Rhenium-Tetrazin-Komplex zum Rhenium-Pyridazin-BCN-Komplex sehr stark zu. Am Intensitätsmaximum des Spektrums von  $[\text{Re}(\text{CO})_3\text{Cl}(4,5\text{-BCN-3-(2-pyrimidyl)-6-methylpyridazin})]$  bei einer Wellenlänge von  $\lambda = 674 \text{ nm}$  weist der Pyridazin-Komplex eine 54-fach größere Intensität als der Tetrazin-Komplex auf. Der Intensitätsanstieg nach 850 nm ist auf den Einsatz eines Filters zurückzuführen, der Streulicht bis zu dieser Wellenlänge herausfiltert.

## 3 Experimenteller Teil

### 3.1 Methoden und Geräte

Die Synthese von wurde nach dem Syntheseweg von Schnierle et al. durchgeführt. [4]. In einem 1l Dreihalskolben wurde 2-Cyanopyrimidin (4,158 g; 39,8 mmol; 1 Äq) in Ethanol (150 ml) gelöst. Anschließend wurden Hydraziniumhydroxid (50 ml; 1,026 mol; 26 Äq), Acetonitril (130 ml; 2,365 mol; 60 Äq) und Schwefel (2,24 g; 70 mmol) zugegeben und die Lösung wurde bei 55 °C über Nacht gerührt. Anschließend wurde das Lösungsmittel unter vermindertem Druck vollständig entfernt. Der entstandene Feststoff wurde anschließend in Phosphorsäure und Wasser (150 ml; 3:2) gelöst, langsam mit Natriumnitrit (26,21 g; 380 mmol; 9,55 Äq) versetzt und über Nacht gerührt. Danach wurde die Lösung mit einer Natriumhydrogencarbonatlösung (300 ml) versetzt und mit Chloroform (3 × 300 ml) extrahiert. Nach der Extraktion wurde die Lösung über Natriumsulfat getrocknet und filtriert. Das Lösungsmittel des Filtrats wurde anschließend unter vermindertem Druck entfernt und der Feststoff bei -39°C über Nacht auskristallisiert. Der pinke Feststoff wurde danach über Säulenchromatographie auf Silica (Chloroform) aufgereinigt. Anschließend wurden die Fraktionen zusammengeführt und das Lösungsmittel wurde erneut unter vermindertem Druck entfernt, wodurch 3-Methyl-6-(pyrimidin-2-yl)-1,2,4,5-tetrazin (0,49 g; 2,82 mmol) als pinker Feststoff mit einer Ausbeute von 7,08% erhalten.

Danach wurde das Tetrazin (0,49 g; 2,82 mmol) in Chloroform (100 ml) gelöst und mit  $[\text{Re}(\text{MeCN})_2(\text{CO})_3\text{Cl}]$  (0,517 g; 1,33 mmol) versetzt und bei Raumtemperatur über Nacht gerührt. Im Anschluss wurde das Lösungsmittel unter vermindertem Druck entfernt und durch Säulenchromatographie auf Silica (Chloroform) gereinigt. Daraufhin wurde das Lösungsmittel erneut unter vermindertem Druck entfernt und  $[\text{Re}(\text{CO})_3\text{Cl}(\text{N}_2\text{Tz})]$  (0,643 g) wurde als schwarz-roter Feststoff erhalten. Zum Schluss wurde der Komplex mit Bicyclononin versetzt, wobei die rotbraune Lösung gelblich und anschließend farblos wurde.

#### 3.1.1 UV/Vis Spektroskopie

#### 3.1.2 Fluoreszenzspektrometrie

Zur Untersuchung der Phosphoreszenz des Rhenium-Komplexes vor und nach der iEDDA-Reaktion mit BCN wurde ein Photolumineszenzspektrometer der Serie RF-6000 verwendet. Fluoreszenz bezeichnet die Emission von Licht nach Absorption eines Lichtquants, wohingegen Phosphoreszenz die Emission von Licht nach Übergang eines Elektrons zurück in den Grundzustand beschreibt, die länger an-

dauert als die Fluoreszenz. Anders als im UV/Vis Spektrometer wurde im Winkel von 90° gemessen, um die Anregungsstrahlung der Lampe nicht mit zu messen. Zudem wurde ein Filter hinter die Lichtquelle eingebaut, um Streulicht herauszufiltern.

## 3.2 Synthesen

### 3.2.1 3-Methyl-6-(pyrimidin-2-yl)-1,2,4,5-tetrazin (N<sub>2</sub>-Tz)

### 3.2.2 [Re(CO)<sub>3</sub>Cl(N<sub>2</sub>Tz)]

### 3.2.3 [Re(CO)<sub>3</sub>Cl(4,5-BCN-3-(2-pyrimidyl)-6-methylpyridazin)]

## 4 Zusammenfassung

Im Rahmen dieses Versuchs wurde der Einkernkomplex [Re(CO)<sub>3</sub>Cl(N<sub>2</sub>Tz)] mit dem Tetrazinligand 3-Methyl-6-(pyrimidin-2-yl)-1,2,4,5-tetrazin (N<sub>2</sub>-Tz) ausgehend von 2-Cyanopyrimidin synthetisiert und über eine iEDDA-Reaktion zu [Re(CO)<sub>3</sub>Cl(4,5-BCN-3-(2-pyrimidyl)-6-methylpyridazin)] umgesetzt. Der synthetisierte Ligand und Rhenium-Komplex wurden mittels <sup>1</sup>H charakterisiert und [Re(CO)<sub>3</sub>Cl(N<sub>2</sub>Tz)] sowie [Re(CO)<sub>3</sub>Cl(4,5-BCN-3-(2-pyrimidyl)-6-methylpyridazin)] mittels UV/Vis-Spektroskopie und Fluoreszenzspektrometrie untersucht.

## 5 Literatur

- [1] A. Pinner, *Chem. Ber.* **1893**, *23*, 2126.
- [2] I. Löw, Diss., Universität Stuttgart, **2015**, S. 18–20, 33–34, 148.
- [3] S. Górecki, A. Kudelko, *Applied Sciences* **2025**, *15*, 7–8.
- [4] M. Schnierle, S. Blickle, V. Filippou, M. R. Ringenberg, *Chem. Commun.* **2020**, *56*, 12033–12036.
- [5] "Vorschrift vom Assistenten".