

Einsatz künstlicher Intelligenz zur Metallidentifikation bei der Schrottsortierung

Dr. Raphael Volz
Professor für Angewandte Informatik
Hochschule Pforzheim
März 2019



+

i⁺



Was ist Stahl ?

„Werkstoff, dessen **Massenanteil an Eisen größer** ist als der jedes anderen Elements, dessen **Kohlenstoffgehalt im Allgemeinen kleiner** als 2 % ist und der **andere Elemente enthält.**“

Quelle: DIN EN 10020:2000-07 Punkt 2.1, Eigene Hervorhebung

- Vielseitiger Konstruktionswerkstoff
- Unbegrenzt Wiederverwendbar
- Menge Begleit- und Legierungselemente bestimmt Materialeigenschaften
- 1,8 Mrd. Tonnen produziert in 2018⁽¹⁾

Dominial R P

Werkstoff-Nr. 1.2365	–	DIN-Bezchg. X 32 Cr Mo V 3-3				
Richtanalyse in %:	C	Si	Mn	Cr	Mo	V
	0,32	0,4	0,4	3,0	2,8	0,6

Eigenschaften und Verwendung:

RP ist ein Cr-Mo-V-legierter Warmarbeitsstahl mit sehr hoher Warmfeuerwärmeleitfähigkeit wasserkühlbar, daher unempfindlich gegen Temperaturunterschiede; er eignet sich für:

Strangpreßwerkzeuge der Stahl- und Schwermetallverarbeitung wie z.B. Matrizenhalter, Innenbüchsen;
Druckgußwerkzeuge für Leichtmetalle;
Druckgußwerkzeuge bei Schwermetall und größeren Wandstärken;

Bildquelle: http://www.kindtakimcelik.com/de/_tabelle/_warm/rp.pdf
Anmerkung: (1) Quelle World Steel Association

Sortenreine Materialien haben höheren Wert im Recycling

Ausgangslage

- Schnellarbeits- und Werkzeugstähle fallen in größeren Mengen als Abfall in der industriellen Produktion an
- Sortierung aber aktuell unwirtschaftlich
 - Materialien mittelpreisig
 - Händische und zeitintensive Sortierung
- Identifikation der Legierungen möglich
 - Röntgenfluoreszenzanalyse
 - Schleiffunkenprobe
 - Optische Emissionsspektroskopie



Bildquelle: Eigene Fotografie

Sortenreine Materialien haben höheren Wert im Recycling

Motivation

- Verschleppung der Legierungsmetallen beim Recycling durch sortenreine Sortierung von Legierungen verhindern
- Sortierprozess durch Automatisierung beschleunigen
- Wirtschaftlichkeit der Sortierung in Deutschland gewährleisten

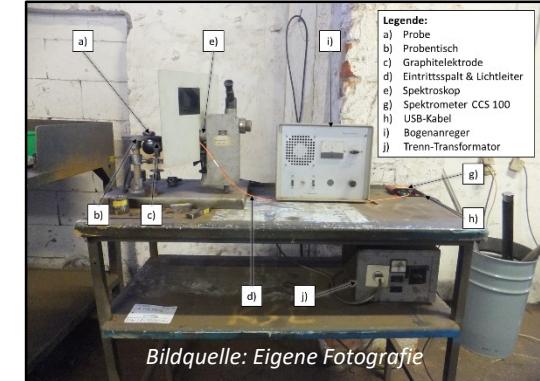
Ziel

Schnelle und zuverlässige automatische Identifikation von Legierungen



Bildquelle: Eigene Fotografie

Legierungen lassen sich mit Röntgenfluoreszenzanalyse, Schleiffunkenprobe und Spektroskopie identifizieren



Röntgenfluoreszenzanalyse

- Strahlenschutz
- Lange Analyse-
dauer (30 Sek)

Schleiffunkenprobe

- Hitzeschutz
- Erfahrene
Mitarbeiter

Optische Emissions- spektroskopie

- Erfahrene
Mitarbeiter

Nutzung von optischer Emissionsspektroskopie



Röntgenfluoreszenzanalyse

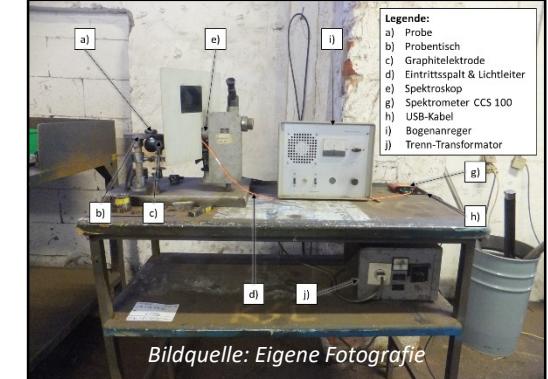
- Strahlenschutz
- Lange Analyse-
dauer (30 Sek)



Bildquelle: Eigene Fotografie

Schleiffunkenprobe

- Hitzeschutz
- Erfahrene
Mitarbeiter



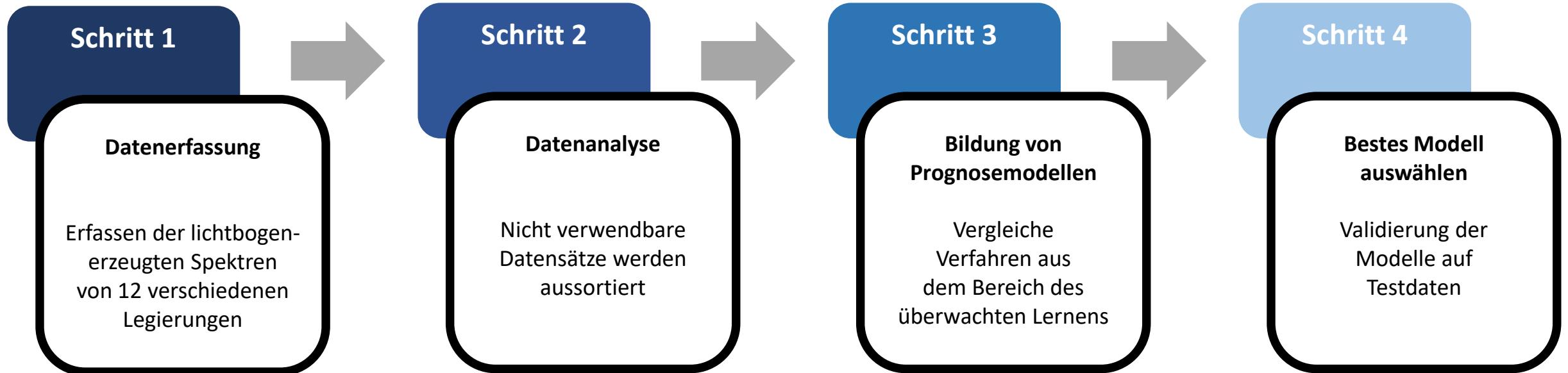
Bildquelle: Eigene Fotografie

Optische Emissions- spektroskopie

- Erfahrene
Mitarbeiter

Einsatz überwachter Lernverfahren

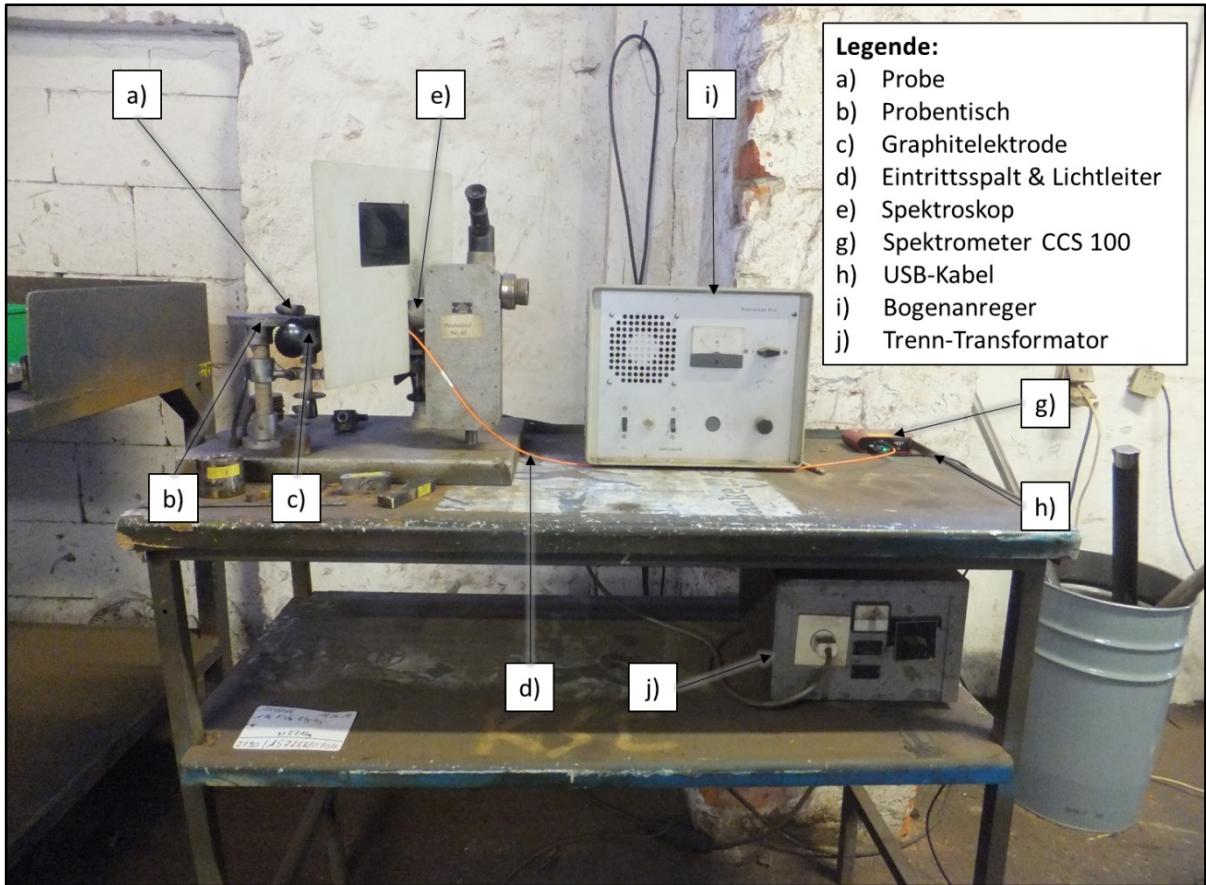
Datenerfassung als wesentlicher Schritt der Vorgehensweise



Schritt 1

Datenerfassung

Versuchsaufbau

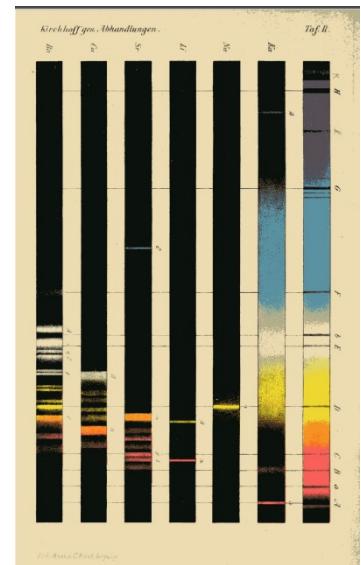


Funktionsprinzip optischer Emissionsspektroskopie

- Jedes Element hat ein charakteristisches Spektrum
- Über die Wellenlänge und die Strahlungsintensität lassen sich Rückschlüsse über die chemische Zusammensetzung der Probe ziehen

Versuchsaufbau:

- Spektroskopie-Arbeitsplatz bei Cronimet
 - Lichtbogengenerator des Herstellers
R. Fuess Berlin-Steglitz
 - Spektroskop
- Ausgerüstet mit einem Spektrometer
 - Thorlabs CCS 100
(Wellenlängenbereich
350 – 700 nm)



Bildquelle: Kirchhoff 1860
(<http://archiv.ub.uni-heidelberg.de/volltextserver/15657/1/spektral.pdf>)

Was wird gemessen:

- Relative Intensität der Spektren nach Wellenlänge
(Messwert zwischen 0 und 1)

Schritt 1

Datenerfassung

Verwendete Proben



Stichprobenumfang

HSS ohne Kobalt

- 1.3346
- 1.3343
- 1.3355
- P9 (AISI)

HSS mit Kobalt

- 1.3243
- 1.3244
- 1.3247
- 1.3255
- 1.3207

CrMoV (Chrom Molybdän Vanadium)

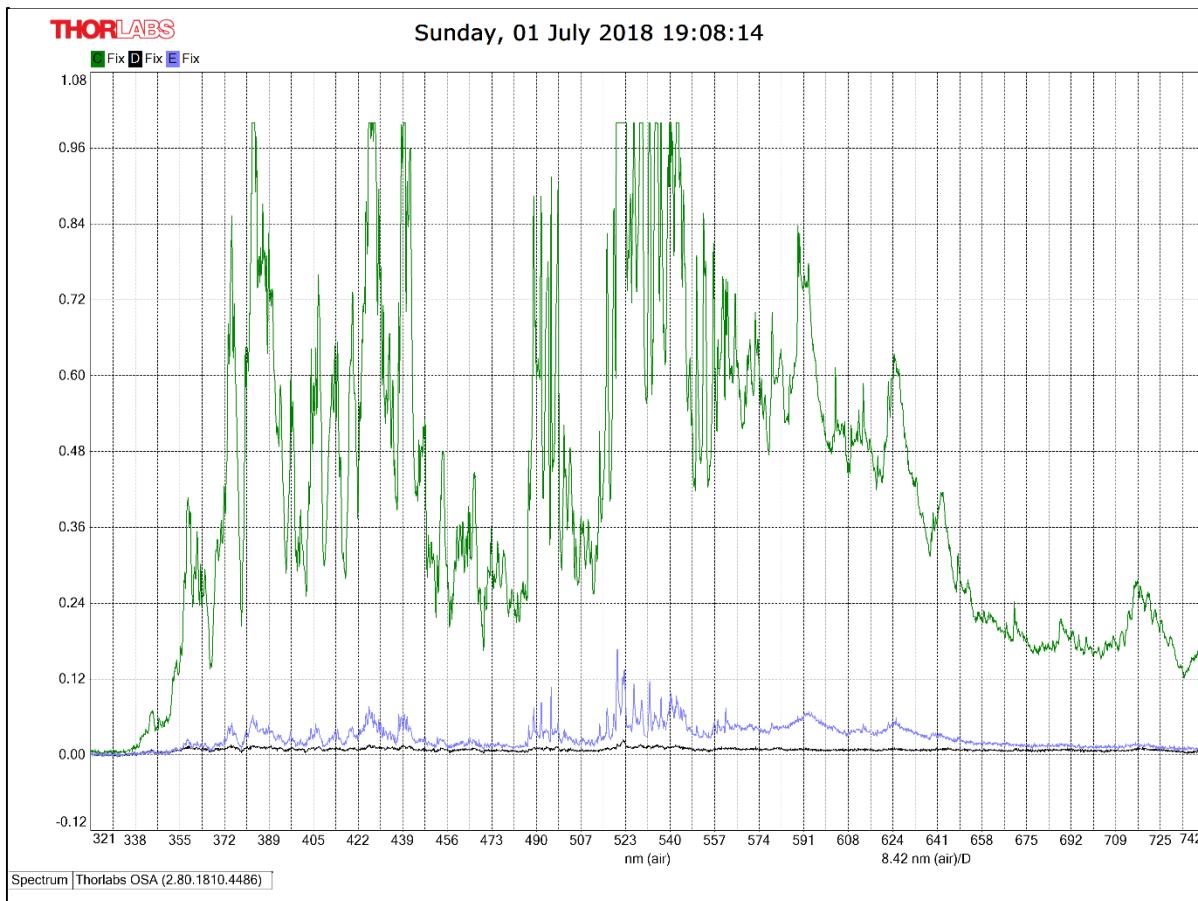
- 1.2379
- 1.2365
- 1.2344

- 3 Legierungsgruppen
HSS mit/ohne Kobalt
und CrMoV
- 2 Messreihen erfasst
- Messreihe 1 :
4800 Spektren
 - 200 Spektren je
 - 2 Proben je
 - 12 Legierungen
- Messreihe 2:
2100 Spektren
 - 200 Spektren je
 - 2 Proben je
 - 10 Legierungen
 - 1 Probe für
eine Legierung

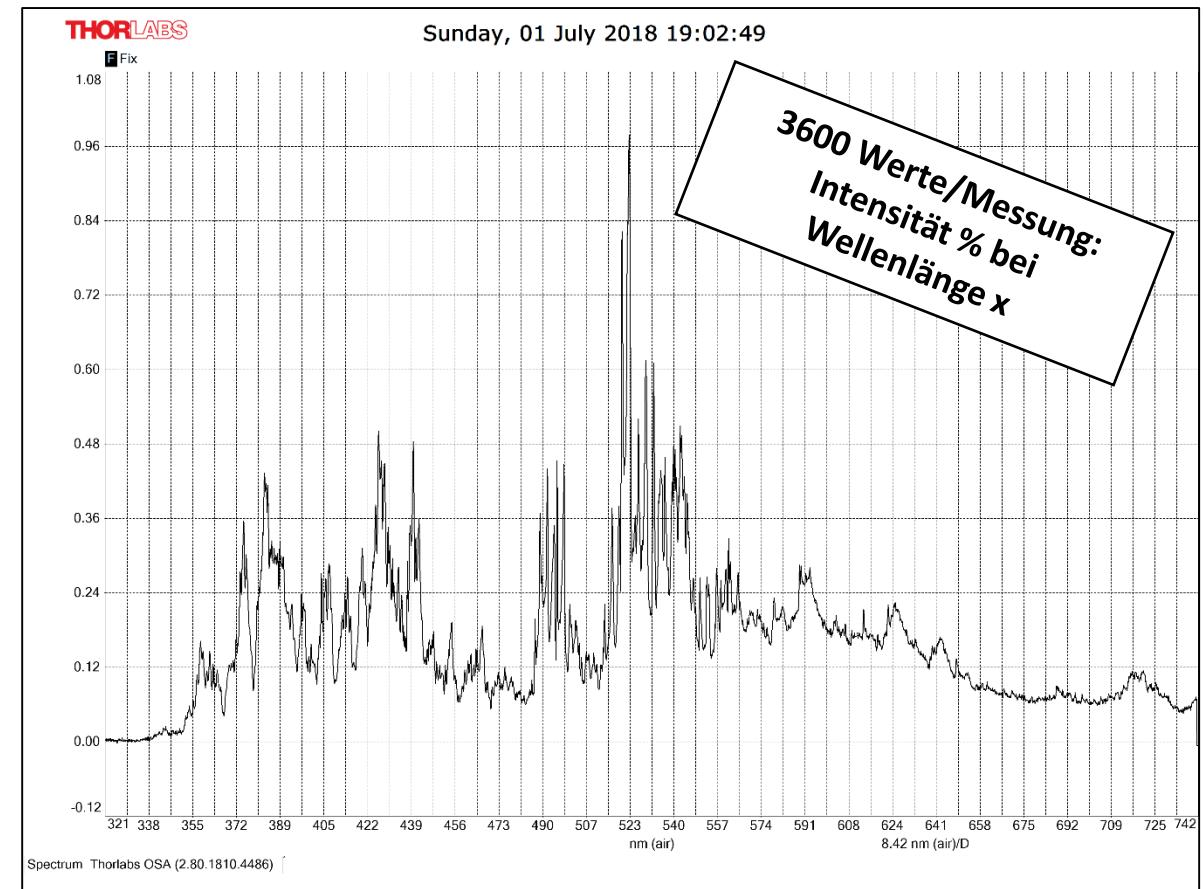
Schritt 2

Ungeeignete Spektren werden aussortiert

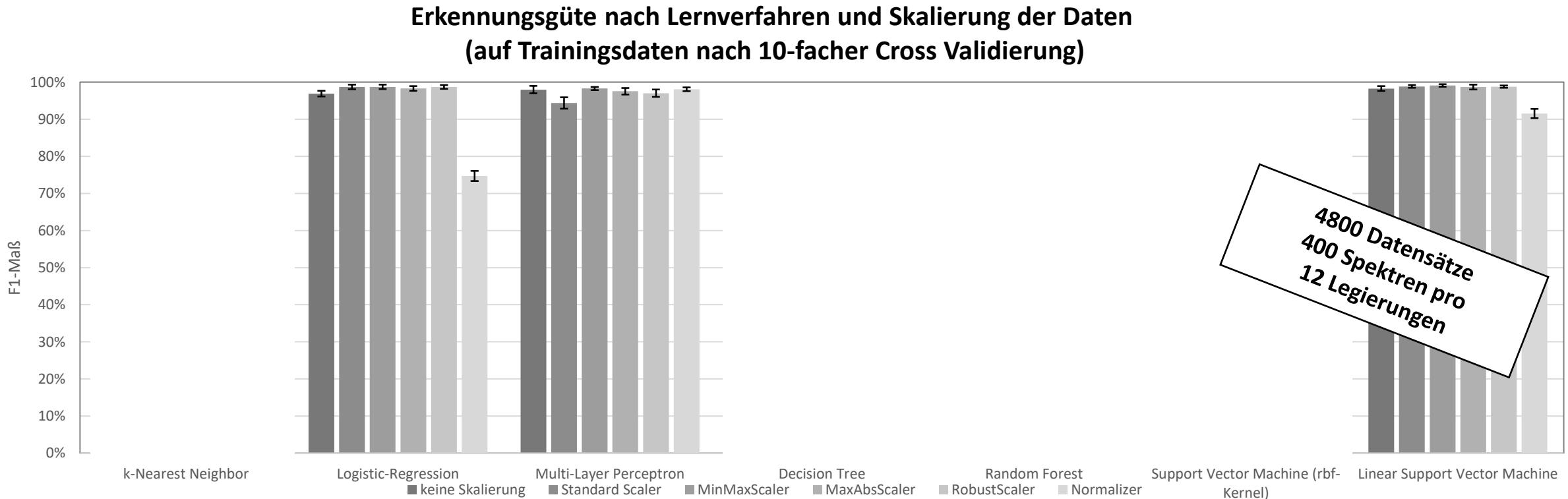
Nicht-verwendbares Spektrum (Legierung 1.2379)



Verwendbares Spektrum (Legierung 1.2379)



Erster Test vergleicht Lernverfahren und Skalierung der Daten

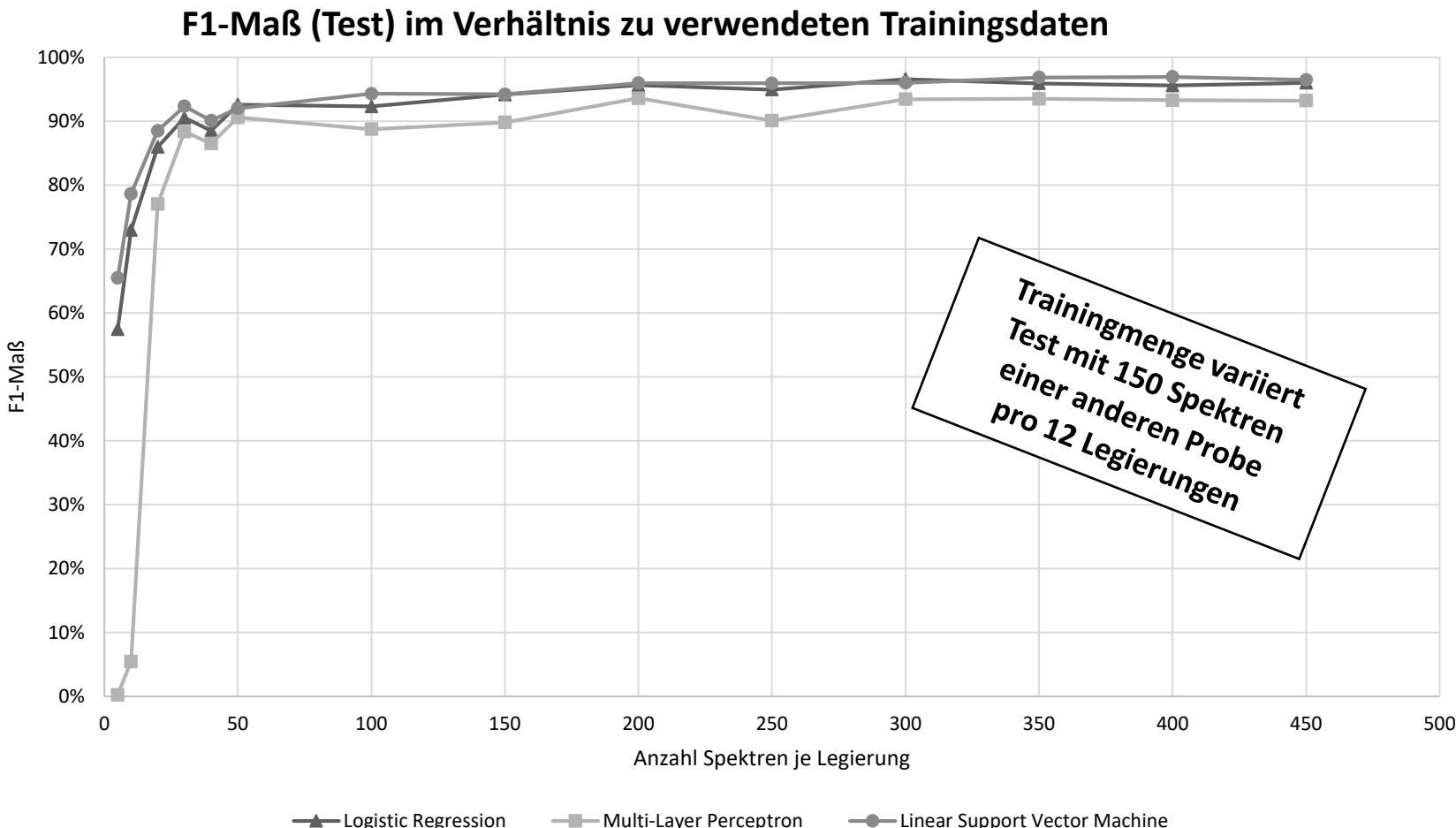


- Erkennungswahrscheinlichkeit abhängig von Lernverfahren und verwendeter Skalierung der Daten
- Erkennungsgeschwindigkeit abhängig vom Lernverfahren

- Für weiterführende Untersuchung, Fokus auf drei Verfahren:
- Lineare SVM (99,1%)
 - Logistische Regression (98,9%)
 - Multi-Layer Perceptron (98,3%)

Schritt 3

Mehr Trainingsdaten verbessern die Lernergebnisse

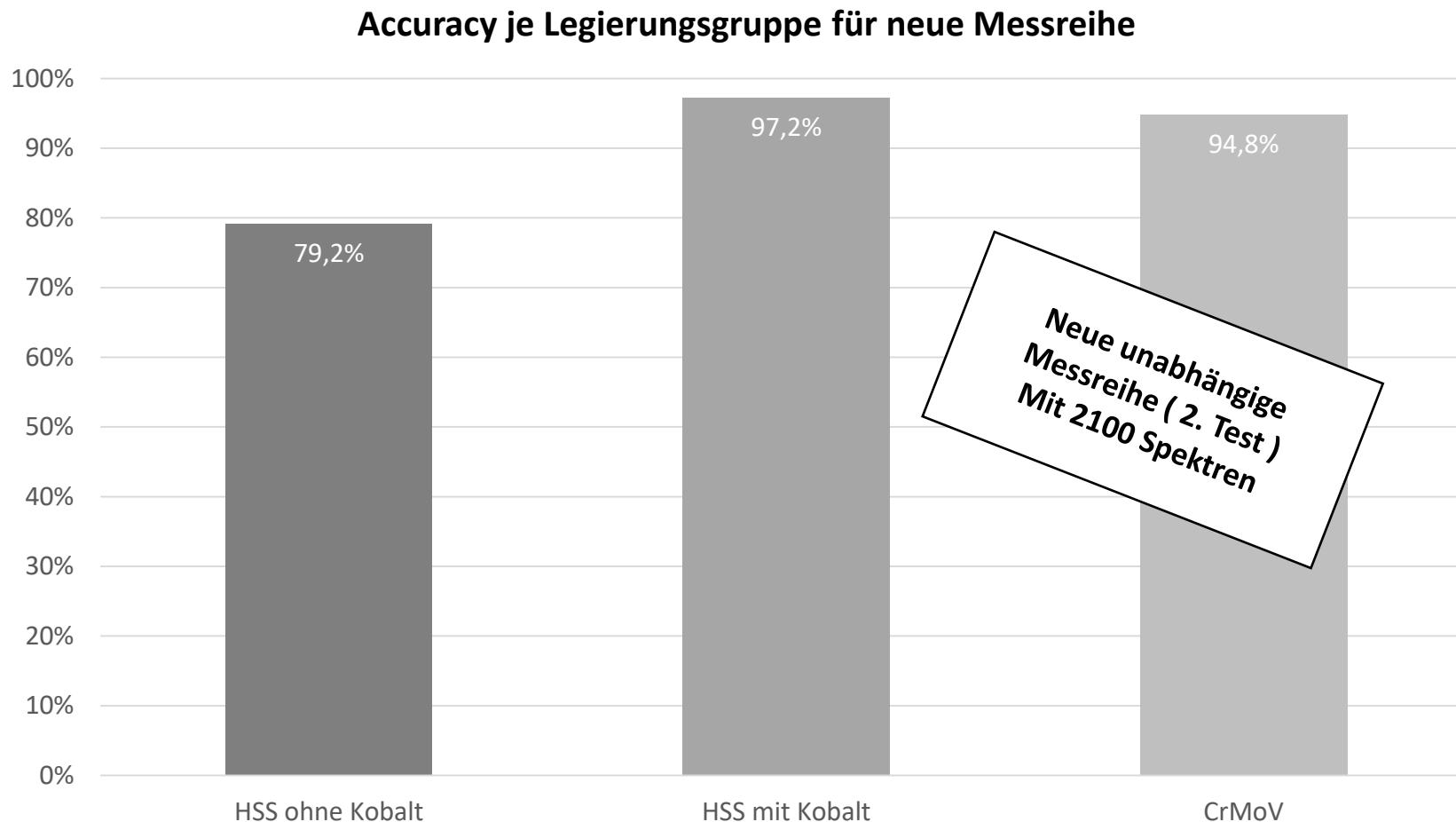


Ergebnisse

- Mit steigender Anzahl an Trainingsdaten steigt die Erkennungsrate auch für Testdaten
 - F1-Maß (Test-Daten)
 - Lineare SVM: 96,9%
 - Log. Regression: 96,0%
 - Multi-Layer Perceptron: 93,3%
- Weitere Betrachtung fokussiert auf das lineare SVM-Verfahren

Schritt 4

Qualität der Erkennung variiert nach Legierungen



Ergebnisse

- Mittlere Accuracy 91,5% auf allen Testdaten
- Einzelne Legierungsarten konnten unterschiedlich gut erkannt werden
 - HSS ohne Kobalt: 79,2%
 - HSS mit Kobalt: 97,2%
 - CrMoV: 94,8%

Data Science macht automatisierte Metallidentifikation möglich

Zusammenfassung

Metallegierungen können automatisch identifiziert werden

- Erkennungsgenauigkeit von bis zu 95% je nach Legierungsart
- Übertrifft die Leistungsfähigkeit menschlicher Mitarbeiter

Schnelle und einfache Sortierung ist möglich

- Klassifikation der Messdaten <1 Sekunde

Ausblick

- Ausweitung des Datensatzes
 - Weitere Proben innerhalb der Legierungsspezifikationen finden
 - Weitere Legierungen untersuchen
- Ausarbeitung eines Projektantrags für weiterführende F&E mit Cronimet
 - Ziel: Entwicklung einer automatisierten Softwarelösung zur Metallidentifikation



Backup

29.3.2019
Auer, M.; Oßwald, K.; Volz, R.; Woidasky, J.: *Einsatz künstlicher Intelligenz zur Metallidentifikation bei der Schrottsortierung.*
In: Bockreis, A. et al. (Hrsg.): *9. Wissenschaftskongress Abfall- und Ressourcenwirtschaft.*
Innsbruck University Press, 2019, ISBN 978-3-903187-48-1, S. 17-22,

Beschreibung Englisch

- Source: <https://steelselect.com>

Designation by Standards

Brand Name	Ravne	Mat. No.	DIN	EN	AISI/SAE
SIRAPID 3346	BRM1	1.3346	S2-9-1 †	HS2-9-1	M1

Chemical Composition (in weight %)

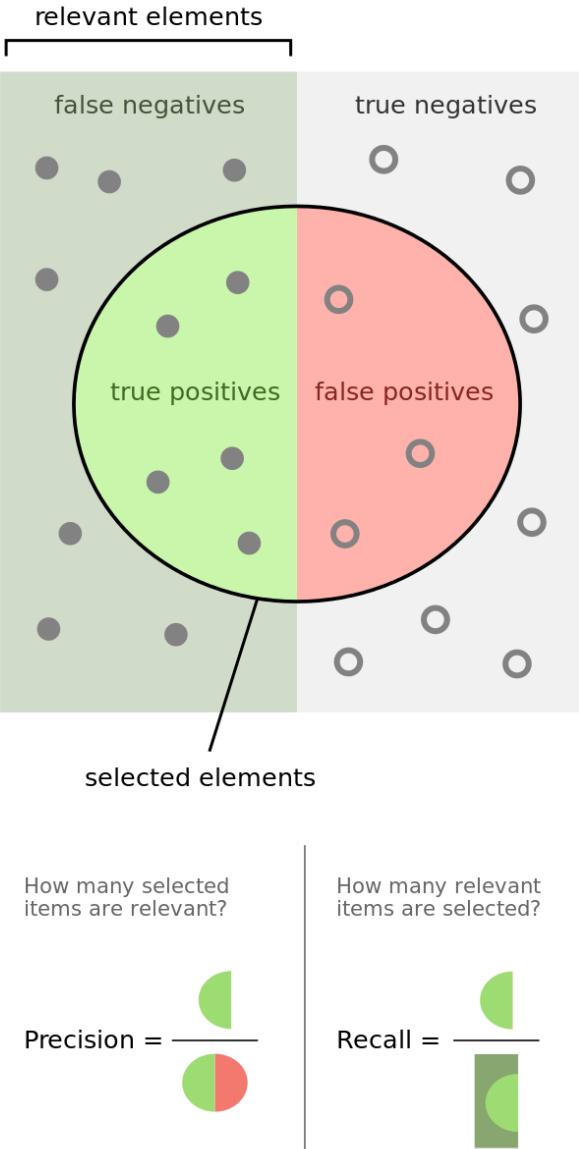
C	Si	Mn	Cr	Mo	Ni	V	W	Others
0.82	max. 0.45	max. 0.40	3.85	8.60	-	1.15	1.75	-

Description

M1 is a molybdenum, chromium, vanadium alloy tool steel generally known as a Molybdenum High Speed Tool Steel. It is one of the most widely available tool steels in use today. It is similar in properties to the tungsten tool steels (T series) at a lower. Very tough high-speed Mo steel good grindability.

Applications

Twist drills, thread cutting tools, hobs and dies for broaching and cold flow pressing, cross recess dies for screw manufacture, cold rolling for e.g. Sendzimir equipment.



F1 Maß

- Das F-Maß kombiniert Genauigkeit (p) und Trefferquote (r) mittels des gewichteten harmonischen Mittels:

$$\bullet F_1 = 2 * \frac{p * r}{p + r}$$

$$\bullet p = \frac{TP}{TP + FP}$$

$$\bullet r = \frac{TP}{TP + FN}$$

=?	0	1
0	TN	FP
1	FN	TP

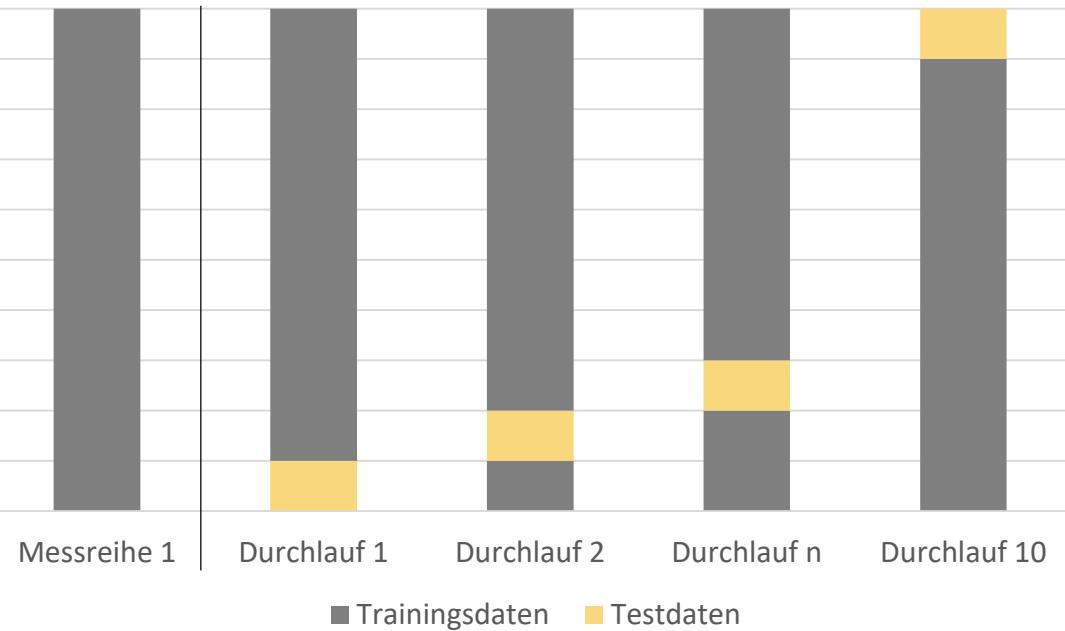
Bildquelle: Wikipedia

Auswahl geeigneter überwachter Lernverfahren

Test 1 – Vergleich der Erkennungswahrscheinlichkeit verschiedener Lernverfahren

Ziel: Auswahl geeigneter Lernverfahren und geeigneter Skalierung der Daten

Vorgehensweise 10-fache Kreuzvalidierung



Daten:

4800 Spektren aus
Messreihe 1
(400 Spektren je
Legierung)

Training-Test-Teilung:
10-fache Kreuzvalidierung

Auswertung:
Gemittelter F1-Maß der
10-fachen
Kreuzvalidierung &
Erkennungsgeschwindig-
keit

Verwendete Algorithmen

- k-Nearest Neighbor
- Logistic Regression
- Mult-Layer Perceptron
- Decision Tree
- Random Forest
- Lineare Support Vector Machine (SVM)
- Support Vector Machine

mit rbf-Kernel Verwendete Skalierung der Daten

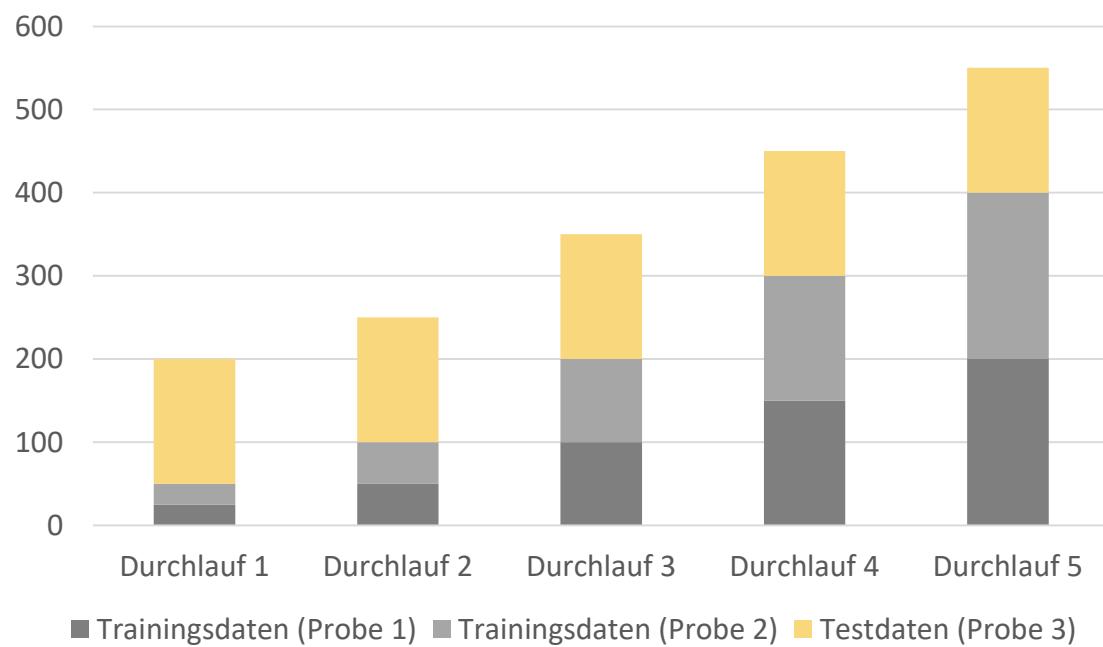
- StandardScaler
 - MinMaxScaler
 - MaxAbsScaler
 - RobustScaler
 - Normalizer
- Kein Skalierung der Daten

Schritt 2

Bestimmung geeigneter Trainingsdaten

Ziel: Weitere Auswahl geeigneter Lernverfahren
Untersuchen der Erkennungswahrscheinlichkeit
mit
zunehmender Anzahl an Trainingsdaten

Training-Test-Teilung (für 1.3243)



Daten:

4800 Spektren aus
Messreihe 1

Training-Test-Teilung:
2 Proben je Legierung
zum Trainieren,
1 Probe je Legierung zum
Testen (150 Spektren)

Bewertung:

F1-Maß

Verwendete Algorithmen

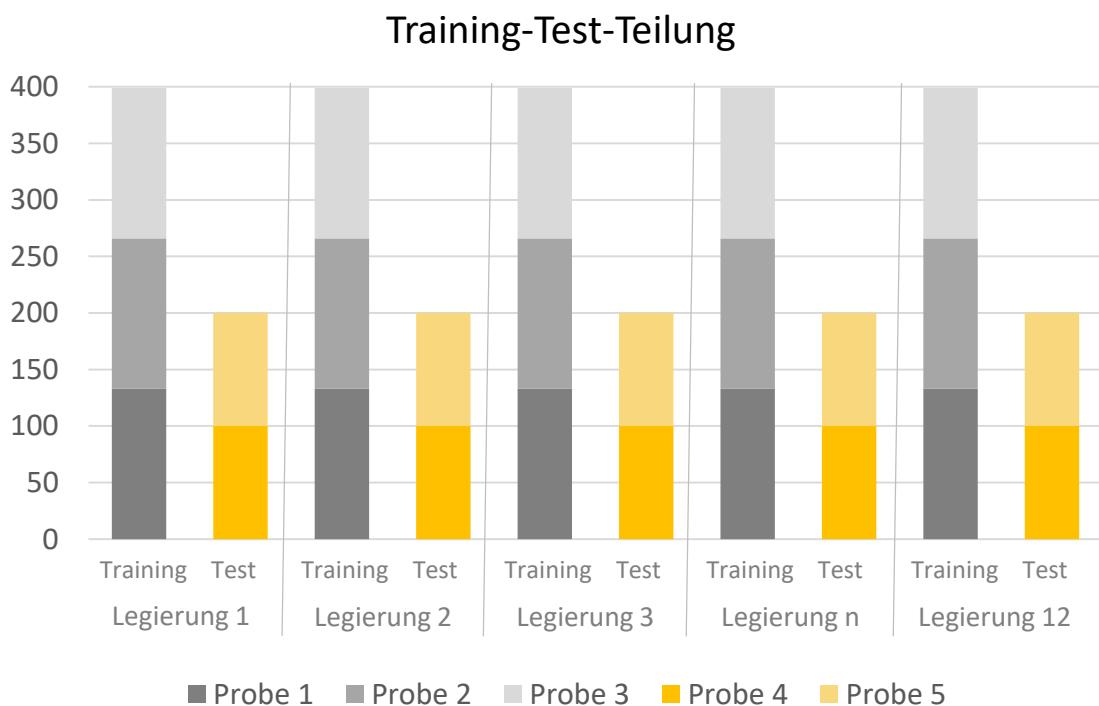
- Lineare Support Vector Machine (SVM)
- Logistic Regression
- Mult-Layer Perceptron
- ~~k Nearest Neighbor~~
- ~~Decision Tree~~
- ~~Random Forest~~
- ~~Support Vector Machine~~

Verwendete Skalierung der Daten

- MinMaxScaler
- ~~StandardScaler~~
- ~~MaxAbsScaler~~
- ~~RobustScaler~~
- ~~Normalizer~~
- ~~Kein Skalierung der Daten~~

Auswahl des besten Modells mit neuen Daten

Ziel: Validierung des ausgewählten Lernverfahrens



Daten:

4800 Spektren aus
Messreihe 1 &
2400 Spektren aus
Messreihe 2

Training-Test-Teilung:

4800 Spektren (Messreihe
1) als Trainingsdaten
2400 Spektren (Messreihe
2) als Testdaten

Auswertung:

Konfusionsmatrix & F1-Maß

- Legierung (z.B. 1.3243 & 1.3244)
- Legierungsgruppe (z.B. HSS mit & HSS ohne Kobalt)

Verwendete Algorithmen

- Lineare Support Vector Machine (SVM)
- ~~Logistic Regression~~
- ~~Mulit-Layer Perceptron~~
- ~~k-Nearest Neighbor~~
- ~~Decision Tree~~
- ~~Random Forest~~
- ~~Support Vector Machine~~

Verwendete Skalierung der Daten

- MinMaxScaler
- ~~StandardScaler~~
- ~~MaxAbsScaler~~
- ~~RobusScaler~~
- ~~Normalizer~~
- ~~Kein Skalierung der Daten~~

Schritt 2

Qualität der Erkennung variiert nach Legierungen

Konfusionsmatrix

		Vorhergesagte Legierung												
		HSS ohne Co				HSS mit Co				CrMoV				
Tatsächliche Legierung	HSS ohne Co	Legierung	1.3346	1.3343	1.3355	P9 (AISI)	1.3243	1.3244	1.3247	1.3255	1.3207	1.2379	1.2365	1.2344
	HSS ohne Co	1.3346	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	
	HSS ohne Co	1.3343	0,00	0,53	0,00	0,00	0,19	0,08	0,00	0,16	0,00	0,00	0,05	0,00
	HSS ohne Co	1.3355	0,00	0,26	0,14	0,52	0,01	0,00	0,00	0,08	0,00	0,00	0,00	0,00
	HSS ohne Co	P9 (AISI)	0,02	0,00	0,02	0,90	0,03	0,00	0,01	0,01	0,00	0,00	0,00	0,03
	HSS mit Co	1.3243	0,00	0,03	0,00	0,01	0,02	0,42	0,43	0,11	0,01	0,00	0,00	0,00
	HSS mit Co	1.3244	0,00	0,01	0,00	0,01	0,01	0,89	0,03	0,07	0,00	0,00	0,00	0,00
	HSS mit Co	1.3247	0,01	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,98	0,01	0,00	0,00	0,00	0,00
	HSS mit Co	1.3255	0,00	0,00	0,03	0,03	0,06	0,00	0,00	0,57	0,32	0,00	0,00	0,01
	HSS mit Co	1.3207	0,00	0,00	0,00	0,03	0,00	0,52	0,00	0,00	0,46	0,00	0,00	0,00
CrMoV	CrMoV	1.2379	0,00	0,00	0,00	0,00	0,01	0,00	0,00	0,02	0,00	0,98	0,00	0,00
	CrMoV	1.2365	0,00	0,00	0,00	0,15	0,00	0,01	0,03	0,00	0,00	0,15	0,66	0,00
	CrMoV	1.2344	0,02	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,90	0,03	0,06

Anmerkungen: Relativer Anteil der Klassifikationen pro Zeile (Zeilensumme ergibt jeweils 100%)

Ergebnisse

- Accuracy pro Leg. 55,5%
- Viele Legierungen wurden verwechselt, z. B.
 - 1.3355 mit 1.3343
 - 1.3243 mit 1.3244 & 1.3247
 - 1.2344 mit 1.2379

Ursachen

- Auswahl der Proben
- Testdaten werden von den Trainingsdaten nicht ausreichend abgebildet
- Proben liegen außerhalb der Legierungsspezifikationen