

BRUTEFORCING IN DER TEMPERATURGESTÜTZTEN  
TODESZEITSCHÄTZUNG

LOREEN HENNEICKE



Dissertation zur Erlangung der medizinischen Doktorwürde

Loreen Henneicke: *Bruteforcing in der temperaturgestützten Todeszeit-schätzung*, Dissertation zur Erlangung der medizinischen Doktorwürde,

Tag der Promotion: 18.02.2025

Dekan: Univ.-Prof. Dr. med. M. Hannig

1. Berichterstatter: Univ.-Prof. Dr. med. P. Schmidt

2. Berichterstatter: Univ.-Prof. Dr. med. W. Schulz-Schaeffer

Gewidmet meinem verstorbenen Großvater Manfred und meiner  
verstorbenen Großmutter Marianne, die mich immer ermutigt haben.



## ABSTRACT

---

The „bruteforcing method“ (BF method) presented in this work is a new approach to temperature-based time-to-death estimation. The nomogram method (NM) is currently used in routine forensic medicine. The NM calculates the time that has elapsed since death (estimation of the time since death /  $T_{sD}$ ). In addition to the rectal temperature ( $T_{(r)}$ ) and ambient temperature ( $T_{(a)}$ ), the so-called correction factors (CF), which enable an adjustment to special cooling scenarios, are included in the calculation. The assumed value for the CF, individual body proportions (e.g. child) and the rectal temperature at the time of death ( $T_{(r@D)}$ ) must be estimated or assumed with a fixed value. This results in a certain subjectivity of the time of death estimation (using the NM method).

The aim of this work is to reduce the subjectivity of the time of death estimation by using the BF method. The basis for this is testing different values for the cooling weight (cooling weight /  $cw$ ). This corresponds to the value at which a body cools down under the influence of CF and body proportions. The aim here is to calculate a value for the time of death that is constant over time. This can then be plotted graphically as a function of time as a cooling weight curve (CWC). If all parameters used in the calculation are correctly assumed, a horizontal straight line results. Based on the curve shape of the CWC, statements can therefore also be made about the correctness of the assumed parameters ( $T_{(a)}$  and  $T_{(r@D)}$ ).

First, based on the mathematical description of the cooling of the corpses, ideal cooling curves were modeled for known parameters. The BF method was then applied to these cooling curves. For deliberately made false assumptions regarding  $T_{(a)}$  and  $T_{(r@D)}$ , characteristic curve shapes of the CWC were shown. In particular, it was possible to detect an increased  $T_{(r@D)}$  and a falsely high or falsely low value for  $T_{(a)}$ .

Furthermore, to test the BF method in practice, a total of ten cooling dummies with a real weight between 5.9 kg and 26.3 kg were produced according to the „original recipe“ of the NM method and used for cooling experiments. The cooling dummies were equipped with a self-made setup of measuring probes and Raspberry Pi computers and read out automatically. A total of 127 cooling experiments were carried out for the dummies under different  $T_{(a)}$  and different envi-

ronmental conditions with a total length of the cooling experiments of about 130 days. After smoothing with a smoothing filter (Sawitzky - Golay - Filter / SG-Filter), the derived cooling data were fed into the evaluation.

The BF method was then applied to the cooling data using a script written in the PYTHON programming language. Bruteforcing was applied using a Python script. Expected values were calculated for a large number of possible cooling weights at defined time intervals using the cooling data derived. A cooling weight was then accepted as correct if the time difference discussed the expected value of the time difference of the selected temperature intervals.

At first a purely „ignorant approach“ took place, which also did not include a well-known increase of the  $T_{(r@D)}$  in the considerations. Despite this lack of adjustment, the overall results were satisfactory. Especially in special cases (negative  $T_{(a)}$ , „broken experiments“ and childlike proportions of the cooling dummies), the calculated results were superior to the published, statistical benchmarks of the NM method. These advantages were particularly evident at low ambient temperatures, which is due to a peculiarity of the calculation formula with different parameter assumptions for low and high ambient temperatures.

Furthermore, chilling data were derived from 17 pigs killed in another toxicology experiment. The BF method was then also applied to this cooling data. Since a large number of pigs had a higher rectal temperature than humans, it was included in the calculation as part of an „educated-approach“. After an analysis of the CWC derived for the pigs, certain false assumptions for  $T_{(a)}$  and  $T_{(r@D)}$  could be adjusted. Satisfactory results could also be calculated here. The „educated-approach“ led to an improvement in the statistical benchmarks of the BF method.

Compared to the current gold standard, the results were satisfactory and probably even advantageous, especially under special cooling conditions. These should be further investigated in further practical tests on corpses.

## ZUSAMMENFASSUNG

---

Die in der vorliegenden Arbeit vorgestellte Methode „Bruteforcing-Methode“ (BF-Methode) ist ein neuer Ansatz zur temperaturbasierten Todeszeitschätzung. Aktuell wird in der rechtsmedizinischen Routinearbeit die Nomo-

gramm-Methode (NM) verwendet. Die NM berechnet hierbei die seit dem Tode verstrichene Zeit (Schätzung der Time since Death /  $T_{sD}$ ). In die Berechnung fließen neben der Rektaltemperatur ( $T_{(r)}$ ) und Umgebungstemperatur ( $T_{(a)}$ ) die sogenannten Korrekturfaktoren (CF), die eine Anpassung an spezielle Kühlszenarien ermöglichen, ein. Der angenommene Wert für die CF, individuelle Körperproportionen (z. B. Kind) und die Rektaltemperatur zum Zeitpunkt des Todes ( $T_{(r@D)}$ ) müssen hierfür geschätzt bzw. mit einem festen Wert angenommen werden. Dies hat eine gewisse Subjektivität der Todeszeitschätzung (mittels NM-Methode) zur Folge.

Ziel dieser Arbeit ist es, die Subjektivität der Todeszeitschätzung, durch die Anwendung der BF - Methode, zu reduzieren. Basis hierfür bildet das Erproben verschiedener Werte für das Kühlgewicht (cooling weight /  $cw$ ). Dieses entspricht dabei dem Wert, dem ein Körper entsprechend unter Einfluss von CF und Körperproportionen abkühlt. Ziel ist es hierbei, einen über den Auskühlzeitraum konstanten Wert für die Todeszeit zu berechnen. Graphisch kann dieser dann in Abhängigkeit von der Zeit als Kühlgewichtskurve (cooling weight curve /  $CWC$ ) aufgetragen werden. Bei korrekter Annahme aller in die Berechnung eingehenden Parameter ergibt sich eine horizontale Gerade. Anhand der Kurvenform der CWC können daher auch Aussagen über die Korrektheit der angenommenen Parameter ( $T_{(a)}$  und  $T_{(r@D)}$ ) getroffen werden.

Zunächst, wurden ausgehend von der mathematischen Beschreibung der Leichenkühlung, ideale Kühlkurven für bekannte Parameter modelliert. Auf diese Kühlkurven wurde dann die BF - Methode angewendet. Für bewusst getroffene Fehlannahmen bezüglich  $T_{(a)}$  und  $T_{(r@D)}$  zeigten sich charakteristische Kurvenformen der CWC. Insbesondere war hierbei eine Detektion einer erhöhten  $T_{(r@D)}$  und einer falsch - hoch bzw. falsch niedrig angenommenen Wertes für  $T_{(a)}$  möglich.

Weiterhin wurden zur Erprobung der BF-Methode in der Praxis insgesamt zehn Kühldummies mit einem Realgewicht zwischen 5,9 kg und 26,3 kg nach der „Originalrezeptur“ der NM-Methode hergestellt und für Kühlexperimente verwendet. Hierbei wurden die Kühldummies mit einem selbst gebauten Setup aus Messsonden und Raspberry Pi Computern bestückt und automatisiert ausgelesen. Für die Dummies wurden insgesamt 127 Kühlversuche unter verschiedenen  $T_{(a)}$  und verschiedenen Umgebungsbedingungen mit einer Gesamtlänge der Kühlexperimente von ca. 130 Tagen durchgeführt. Die abgeleiteten Kühldaten wurden nach Glättung durch einen Glättungsfilter (Sawitzky - Golay - Filter /  $SG$ -Filter) der Auswertung zugeführt.

Mit einem in der Programmiersprache PYTHON geschriebenen Skript wurde daraufhin die BF-Methode auf die Kühldaten angewendet. Es wurde mittels Python-Skript das Bruteforcing angewendet. Hierbei wurden für eine Vielzahl möglicher Kühlgewichte in zeitlich definierten Abständen anhand der abgeleiteten Kühldaten Erwartungswerte berechnet. Ein Kühlgewicht wurde dann als korrekt akzeptiert, wenn die zeitliche Differenz der Erwartungswert der zeitlichen Differenz der gewählten Temperaturintervalle besprach. Hierbei erfolgte zunächst ein rein „ignoranter Ansatz“, welcher auch eine bekannte Erhöhung der  $T_{(r@D)}$  nicht in die Überlegungen einschloss. Trotz dieser unterbleibenden Anpassung zeigten sich in der Summe zufriedenstellende Ergebnisse. Besonders in Sonderfällen (negative  $T_{(a)}$ , „broken experiments“ und kindliche Proportionen der Kühldummies) waren die berechneten Ergebnisse den publizierten, statistischen Benchmarks der NM-Methode überlegen. Diese Vorteile zeigten sich besonders bei niedrigen Umgebungstemperaturen, was auf eine Besonderheit der Berechnungsformel mit unterschiedlichen Parameterannahmen für niedrige und hohe Umgebungstemperaturen zurückzuführen ist.

Weiterhin wurden an 17 Schweinen, aus einem anderen Experiment der Toxikologie, Kühldaten abgeleitet. Auf diese Kühldaten wurde dann ebenfalls die BF-Methode angewendet. Da eine Vielzahl der Schweine eine gegenüber dem Menschen erhöhte Rektaltemperatur aufwies, wurde diese hier im Rahmen eines „educated-Berechnungsansatzes“ in die Berechnung einbezogen. Nach einer Analyse der für die Schweine abgeleiteten CWC konnte eine Anpassung bestimmter Fehlannahmen für  $T_{(a)}$  und  $T_{(r@D)}$  erfolgen. Auch hier konnten zufriedenstellende Ergebnisse berechnet werden. Der „educated-Berechnungsansatz“ führte hierbei zu einer Verbesserung der statistischen Benchmarks der BF-Methode.

Im Vergleich zum aktuellen Goldstandard ergaben sich zufriedenstellende Ergebnisse und insbesondere auch unter besonderen Abkühlbedingungen wahrscheinlich sogar Vorteile. Diese sollten in weiteren Praxisversuchen an kriminalistisch untersuchten Leichen weiter verifiziert werden.

## DANKSAGUNG

---

An dieser Stelle möchte ich den folgenden Personen Dank aussprechen:

Besonderer Dank gilt Herrn Dr. med. Stefan Potente und Herrn Univ.-Prof. Dr. Peter Schmidt für die hervorragende Betreuung und Unterstützung bei der Umsetzung der gesamten Arbeit. Außerdem möchte ich mich bei Herrn Prof. Dr. Michael D. Menger und Herrn Prof. Dr. Matthias W. Laschke bedanken, die unsere Experimente in der von Ihnen geleiteten Experimentellen Chirurgie ermöglicht haben. Auch möchte ich den gesamten Tierpflegern der Experimentellen Chirurgie, stellvertretend über Fr. Elisabeth Gluding danken, die uns freundlicherweise den Zugang zu den Wärmeschränken und deren Einrichtung gewährt haben. Nicht zuletzt muss ich zudem bei Frau PD Dr. rer. nat. Nadine Schäfer und Herrn Adrian Doerr aus der Abteilung für forensische Toxikologie danken, die uns die Arbeit an ihren getöteten Versuchstieren und damit an biologischem Material erst ermöglicht haben. Ebenso möchte ich dem Team des Sektionssaals Frau Esther Bubel-Weichel (+) und Herrn Roland Klotz für den Zugang zur Leichenkühlung recht herzlich danken. Meinen Eltern und Großeltern, meinem Partner und meinen Freunden danke ich ebenfalls für ihre Ermutigung zu dieser Dissertation.



# INHALTSVERZEICHNIS

---

## I EINLEITUNG

- 1 TODESZEITSCHÄTZUNG IM FRÜHEN POST-MORTALEN INTERVALL 3
  - 1.1 Sich ergebende Fragestellungen 10

## II METHODIK

- 2 METHODENTEIL 13
  - 2.1 Proof of Concept 15
  - 2.2 Kühldummies und Messeinheiten 17
    - 2.2.1 Raspberry Pi Mikrocomputer und Thermometersonden des Typ Ds18b20 zur Ableitung der Temperaturwerte 21
  - 2.3 Design der Kühlexperimente 22
  - 2.4 Abkühlexperimente am Kühldummy 22
  - 2.5 Abkühlexperimente am Schwein 24
  - 2.6 Aufbereitung des Rohdatensatzes 26
  - 2.7 Bruteforcing-Skript zur Berechnung der Endergebnisse 26
    - 2.7.1 Statistische Fehleranalyse 27

## III ERGEBNISSE

- 3 ERGEBNISTEIL 33
  - 3.1 Kühldaten aus den Kühldummy-Experimenten 36
    - 3.1.1 Analyse der CWC-Formen bei korrekter und bewusster Fehlannahme verschiedener Parameter 36
    - 3.1.2 Einzel- und Gesamtbetrachtung der durch die BF-Berechnung abgeleiteten Kühlgewichte 40
    - 3.1.3 Betrachtung der gebrutforcten Kühlgewichte unter Verwendung verschiedener Werte für  $T_{(a)}$  41
    - 3.1.4 Betrachtung der berechneten Kühlgewichte unter Verwendung verschiedener CF aus der Tabelle von HENSSGE 43
  - 3.2 Fehlerberechnung 47
    - 3.2.1 Verwendung korrekter  $T_{(a)}$  und abweichender Werte  $\pm 1$  °C 47
    - 3.2.2 Verwendung erhöhter  $T_{(r@D)}$  49
    - 3.2.3 Darstellung der berechneten Fehlerstreuung in Form von Histogrammen für verschiedene Szenarien 50
    - 3.2.4 Histogramme für verschiedene  $T_{(a)}$ -Bereiche unter Standardbedingungen 51

|       |  |    |
|-------|--|----|
| 3.2.5 | Vergleichende Fehlerverteilung bei erhöhter $T_{(r@D)}$ und normaler $T_{(r@D)}$ unter Standardbedingungen | 53 |
| 3.2.6 | Verwendung unterschiedlicher Korrekturfaktoren im Bereich $CF > 1$ und $CF < 1$                            | 56 |
| 3.3   | Auswertung Kühldaten aus Versuchen am Schweinmodell  | 57 |
| 3.3.1 | CWC-Formen bei Annahme der $T_{(a)}$ mit korrektem Wert und $\pm 1^\circ \text{C}$ am Schweinmodell        | 58 |
| 3.3.2 | Kühlgewichte unter Standardbedingungen und Verwendung von CF „Bedeckung mit Bettdecke“ am Schweinmodell    | 58 |
| 3.3.3 | Sonderfälle  | 59 |
| 3.3.4 | Fehlerberechnung und statistische Benchmarks am Schweinmodell  | 59 |

IV DISKUSSION

|   |            |    |
|---|------------|----|
| 4 | DISKUSSION | 75 |
|---|------------|----|

V APPENDIX

|           |    |
|-----------|----|
| LITERATUR | 83 |
|-----------|----|

## ABBILDUNGSVERZEICHNIS

---

|                |  |    |
|----------------|--|----|
| Abbildung 1.1  | Darstellung einer Kühlkurve  | 4  |
| Abbildung 2.1  | Versuchsaufbau der Abkühllexperimente / Wärmebild der Kühldummies  | 20 |
| Abbildung 2.2  | Schaltplan des Raspberry Pi Mikrocomputers   | 21 |
| Abbildung 2.3  | Versuchsaufbau der Abkühllexperimente am Kühldummy   | 23 |
| Abbildung 2.4  | Versuchsaufbau der Abkühllexperimente an Schweinen   | 25 |
| Abbildung 2.5  | Ablauf des Bruteforcing-Algorithmus  | 29 |
| Abbildung 2.6  | Flußdiagramm über die einzelnen Schritte zur Gewinnung und Bearbeitung der Daten.  | 30 |
| Abbildung 3.1  | CWC für modellierte, ideale Kühl-daten bei verschiedenen Umgebungstemperaturen.  | 34 |
| Abbildung 3.2  | CWC für modellierte, ideale Kühl-daten bei erhöhter Rektaltemperatur zum Tod.  | 34 |
| Abbildung 3.3  | CWC für modellierte, ideale Kühl-daten bei Annahme des falschen Wertes für Faktor A abhängig von der Umgebungstemperatur.                            | 35 |
| Abbildung 3.4  | Darstellung einer Glättung einer Kühlkurve durch den SG-Filter   | 37 |
| Abbildung 3.5  | CWC bei Variation der $T_{(a)}$ (links) und die dazugehörige Kühlkurve (rechts).   | 39 |
| Abbildung 3.6  | CWC mit Initialanstieg bei erhöhter $T_{(r@D)}$ (links) und dazugehörige Kühlkurve (rechts).   | 39 |
| Abbildung 3.7  | CWC d. leichten Kühldummies 4a bei verschiedenen $T_{(a)}$   | 41 |
| Abbildung 3.8  | CWC d. mittelschweren Kühldummies 1a bei verschiedenen $T_{(a)}$   | 42 |
| Abbildung 3.9  | Realgewichte der Kühldummies von HENSSE und bei der BF-Methode im Vergleich mit der dazugehörigen CWC-Kurve bei unterschiedlichen $T_{(a)}$ -Werten. | 43 |
| Abbildung 3.10 | CWC der Kühldummies 1c, 2b, 3b unter Einfluss von CF und unter Standardbedingungen   | 44 |
| Abbildung 3.11 | CWC des Kühldummies 1a / 2c mit Verwendung von CF im Vergleich zur dazugehörigen CWC unter Standardbedingungen                                       | 45 |
| Abbildung 3.12 | CWC des Kühldummies 4a (linke Abb.) und 2c (rechte Abb.) bei Verwendung verschiedener CF   | 45 |

- Abbildung 3.13 Vergleich der berechneten Fehler bei Verwendung des CF nach HENSSGE und des für das BF berechneten CF (CF über 1)      46
- Abbildung 3.14 Vergleich der berechneten Fehler bei Verwendung des CF nach HENSSGE und des für das BF berechneten CF (CF unter 1)      47
- Abbildung 3.15 Berechneter Fehler im Verlauf der Abkühlung bei normaler  $T_{(r@D)}$  für Kühldummy „2c“      48
- Abbildung 3.16 Berechneter Fehler bei erhöhter und normaler  $T_{(r@D)}$  für Kühldummy 1a      48
- Abbildung 3.17 Berechneter Fehler für Kühldummy 3a bei erhöhter und normaler  $T_{(r@D)}$       49
- Abbildung 3.18 Fehlerverteilung der leichten Dummies,  $n = 11$ , Umgebungstemperatur 0 bis 10 °C. Auf der x-Achse ist der Fehler in Stunden abgebildet. Auf der y-Achse ist die Häufigkeit des jeweiligen Fehlers abgebildet.      50
- Abbildung 3.19 Fehlerverteilung der mittelschweren Dummies,  $n = 4$ , Umgebungstemperatur 0 bis 10 °C. Auf der x-Achse ist der Fehler in Stunden abgebildet. Auf der y-Achse ist die Häufigkeit des jeweiligen Fehlers abgebildet.      51
- Abbildung 3.20 Fehlerverteilung aller Dummies bei warmer  $T_{(a)}$  /  $n=13$       52
- Abbildung 3.21 Fehlerverteilung aller Dummies bei positiver  $T_{(a)}$       52
- Abbildung 3.22 Fehlerverteilung aller Dummies bei niedrig-positiver  $T_{(a)}$       54
- Abbildung 3.23 Fehlerverteilung aller Dummies bei negativer  $T_{(a)}$       54
- Abbildung 3.24 Fehlerverteilung aller Dummies bei einer Rektaltemperatur > 38 °C zum Todeszeitpunkt      55
- Abbildung 3.25 Fehlerverteilung der mittelschweren Dummies bei Rektaltemperatur zwischen 37 °C - 38 °C zum Todeszeitpunkt      55
- Abbildung 3.26 Fehlerverteilung aller Dummies (Korrekturfaktor kleiner eins)      56
- Abbildung 3.27 Fehlerverteilung aller Dummies (Korrekturfaktor größer eins)      57
- Abbildung 3.28 CWC von Schwein 14 bei unterschiedlichen  $T_{(a)}$       58
- Abbildung 3.29 Vergleich der CWC von S18 mit Bettdecke und S14 unbedeckt.      59
- Abbildung 3.30 Fehlerkurve von Schwein 14 bei drei unterschiedlichen  $T_{(a)}$       60

- Abbildung 3.31 Teil I: Fehlerverteilung jedes einzelnen Schweine-  
Kühlexperiments im educated- und ignorant-  
Berechnungsansatz 61
- Abbildung 3.32 Teil II: Fehlerverteilung jedes einzelnen Schweine-  
Kühlexperiments im educated- und ignorant-  
Berechnungsansatz 62
- Abbildung 3.33 Teil III: Fehlerverteilung jedes einzelnen Schweine-  
Kühlexperiments im educated- und ignorant-  
Berechnungsansatz 63

## TABELLENVERZEICHNIS

---

|             |   |  |
|-------------|---|--|
| Tabelle 2.1 | Überblick über die von HENSSGE hergestellten<br>Dummies und ihre Maßzahlen 18   |  |
| Tabelle 2.2 | Überblick über die verwendeten Kühldummies<br>und deren Maßzahlen 19  |  |
| Tabelle 2.3 | Tabellarische Übersicht der in den Kühlexperi-<br>menten verwendeten Schweine 25  |  |
| Tabelle 3.1 | Überblick über die prozentuale Verteilung ver-<br>schiedener Kühlszenarien auf die Gesamtzahl<br>der durchgeführten Dummykühlexperimente 65                         |  |
| Tabelle 3.2 | BF - Berechnungsergebnisse: Tabelle über ge-<br>brutforctes Kühlgewicht und Realgewicht der<br>Kühldummies 66   |  |
| Tabelle 3.3 | Kühlgewichte unter Verwendung von CF für<br>unterschiedliche Kühldummies im Vergleich mit<br>den Kühlgewichten unter Standardbedingun-<br>gen bzw. Realgewichten 67 |  |
| Tabelle 3.4 | Kühlgewichte für Kühldummy 2c und 4a bei<br>Verwendung von CF im Vergleich zu den Kühlg-<br>ewichten unter Standardbedingungen und den<br>Realgewichten 67          |  |
| Tabelle 3.5 | Ergebnisse der CF bzw. CF70-Berechnungen bei<br>Verwendung von CF 67  |  |
| Tabelle 3.6 | Intervallgrenzen der mittels Bruteforcing-Methode<br>bestimmten von Q abhängigen Intervalle im<br>Vergleich mit den Intervallgrenzen nach HENS-<br>SGE 68           |  |
| Tabelle 3.7 | Überblick über die für die leichten bzw. mittel-<br>schweren Kühldummies berechneten Fehler (2<br>SD) im Vergleich zu den Intervallgrenzen nach<br>HENSSGE 68       |  |

|              |   |    |
|--------------|---|----|
| Tabelle 3.8  | Kühlminuten und statistische Maßzahlen für leichte Kühldummies  | 68 |
| Tabelle 3.9  | Kühlminuten und statistische Maßzahlen für die mittelschweren Kühldummies.  | 69 |
| Tabelle 3.10 | Kühlminuten und statistische Maßzahlen für alle Dummies bei warmer $T_{(a)}$ im Bereich $>23^{\circ}\text{C}$   | 69 |
| Tabelle 3.11 | Kühlminuten und statistische Maßzahlen für alle Dummies bei positiver $T_{(a)}$   | 69 |
| Tabelle 3.12 | Kühlminuten und statistische Maßzahlen für alle Dummies bei niedrig-positiver $T_{(a)}$   | 69 |
| Tabelle 3.13 | Kühlminuten und statistische Maßzahlen für alle Dummies bei negativer $T_{(a)}$   | 70 |
| Tabelle 3.14 | Kühlminuten und statistische Maßzahlen für verschiedene Kühlbereiche für erhöhte $T_{(r@D)}$  | 70 |
| Tabelle 3.15 | Kühlminuten und statistische Maßzahlen für verschiedene Kühlbereiche bei normaler $T_{(r@D)}$   | 70 |
| Tabelle 3.16 | Kühlminuten und statistische Maßzahlen für verschiedene Kühlbereiche für alle Kühldummies bei $CF < 1$  | 70 |
| Tabelle 3.17 | Kühlminuten und statistische Maßzahlen für verschiedene Kühlbereiche für alle Kühldummies $CF > 1$ .  | 71 |
| Tabelle 3.18 | Veränderung der von Q-abhängigen Intervalle bei den Schweinen bei Verwendung des „ignorant-Berechnungsansatzes“ (grau hinterlegte Zeilen) und des „educated-Berechnungsansatzes“ (weiß hinterlegte Zeilen). | 71 |
| Tabelle 3.19 | Statistische Benchmarks für die Berechnungsansätze „educated“ oder „ignorant“) bei Schweinen  | 72 |

## ABKÜRZUNGSVERZEICHNIS

---

|     |   |
|-----|---|
| A   | Faktor A in Formel nach HENSSGE                     |
| B   | Faktor B in Formel nach HENSSGE                     |
| BF  | Bruteforcing  |
| cCF | korrigierte Korrekturfaktoren                       |
| CF  | corrective factor (Korrekturfaktor/en)              |
| cm  | Zentimeter  |
| csv | comma-separated-value (durch Komma getrennte Werte) |
| cw  | cooling-weight (Kühlgewicht)                        |

|        |  |
|--------|--|
| CWC    | Cooling-weight-curve (Kühlgewichtskurve)           |
| GPIO   | General-Purpose-Input-Output                       |
| h      | Stunden  |
| kg     | Kilogramm  |
| Kl.    | Kleidung   |
| mCW    | momentanes cooling weight (momentanes Kühlgewicht) |
| NM     | Nomogramm-Methode                                  |
| PMI    | postmortales Intervall                             |
| rbw    | real body-weight (tatsächliches Gewicht)           |
| SD     | Standardabweichung bzw. standard deviation         |
| SG     | Sawitzky-Golay                                     |
| SSH    | Secure Shell                                       |
| t      | Todeszeit, berechnet nach HENSSGE                  |
| T(a)   | Umgebungstemperatur                                |
| T(r@D) | Rektaltemperatur zum Todeszeitpunkt                |
| T(r)   | Rektaltemperatur                                   |
| TsD    | Time since Death (Todeszeit)                       |
| vBW    | virtual body-weight (virtuelles Körpergewicht)     |



Teil I

EINLEITUNG



## TODESZEITSCHÄTZUNG IM FRÜHEN POST-MORTALEN INTERVALL

---

Der Todeszeitschätzung kommt in der Rechtsmedizin, insbesondere in der klassischen Bearbeitung von Tötungsdelikten, ein besonderer Stellenwert zu:

- allgemeine Theorienbildung zum Tathergang (Was ist passiert?)
- Zuordnung zu vorgegebenen Zeiträumen (z. B. Frühschicht oder Spätschicht)
- Abgleich von Alibis (selten)

Einen Überblick über den aktuellen Stand der Forschung sowie die historische Entwicklung hierzu geben [30, 31]. Idealerweise soll hierbei der exakte Todeszeitpunkt (z. B. 14:39 Uhr) an die Polizei übermittelt werden, wobei dieser jedoch nur selten bekannt ist (z. B. bei einem Kopfschuss in Anwesenheit von Zeugen). Daher muss in der rechtsmedizinischen Praxis zumeist eine Schätzung eines sogenannten postmortalen Intervalls (PMI) erfolgen (im Sinne von: „vor X bis Y Stunden verstorben“). Das PMI lässt sich dabei in ein frühes - und ein spätes postmortales Intervall einteilen.

Im *frühen postmortalen Intervall* haben, im Gegensatz zum späten postmortalen Intervall, noch keine wesentlichen Fäulniserscheinungen eingesetzt. Diese Phase ist hinsichtlich der verwendeten Methoden zur Todeszeitbestimmung durch die Leichenabkühlung (Algor mortis), die Leichenflecken (Livores)<sup>1</sup>, die Totenstarre (Rigor mortis)<sup>2</sup> und die supravitalen Reaktionen<sup>3</sup> gekennzeichnet.

Die Komplex - Methode (englisch „compound method“) zieht qualitative und quantitative Ausprägungszustände von Leichenerscheinungen und supravitalen Reaktionen zur Todeszeitschätzung heran. Idealerweise kann hierdurch das Todeszeitintervall auf zwei Seiten

- <sup>1</sup> Die als Livores bezeichneten Totenflecken können anhand verschiedener Qualitäten (Wegdrückbarkeit, Umlagerbarkeit, Farbe), sowie ihrer Quantität (räumliche Ausdehnung, Zusammenlaufen) beurteilt werden.
- <sup>2</sup> Die Totenstarre (auch Rigor mortis) tritt nach dem Tod als Folge des Verbrauchs der intrazellulären ATP - Speicher in der Muskulatur auf. Auch sie kann hinsichtlich der Quantität (Auftreten und Grad des Auftretens), sowie ihrer Qualität (dem Wiederauftreten nach z.B. Brechen im Ellbogengelenk) subjektiv beurteilt werden.
- <sup>3</sup> Supravitale Reaktionen sind zunächst nach dem Tod noch erhaltene Körperreaktionen auf verschiedene Reize. Verwendet werden elektrische Stimulation der mimischen Muskulatur, chemische Stimulation der Pupillenmuskulatur und mechanische Stimulation von Skelettmuskeln.

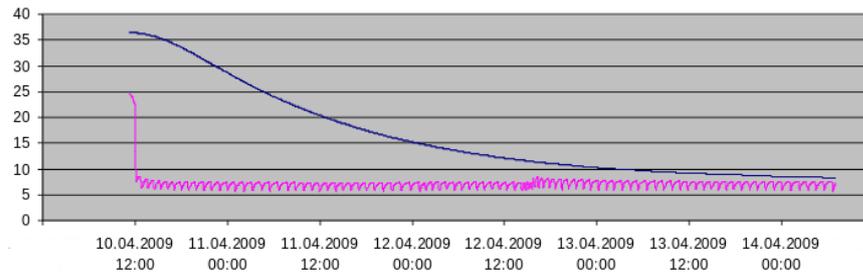


Abbildung 1.1: Mit Temperaturloggern aufgezeichnete Kühlkurve (Fall-sammlung Rechtsmedizin Frankfurt, Potente). Sägezahnartiger Verlauf der Umgebungstemperatur aufgrund von Lagerung im Kühlraum.

begrenzt werden („im Sinne von: Die Person ist frühestens bzw. spätestens X Stunden vor Prüfung verstorben, beziehungsweise höchstens bzw. mindestens X Stunden verstorben“) [10, 11, 19, 20]. Die verschiedenen Qualitäten und Quantitäten werden hierbei durch einen Untersucher bestimmt und in Zusammenschau der Befunde anhand der bekannten Grenzwerte subjektiv bewertet [12, 15, 45].

Bei den nicht temperaturbasierten Methoden im frühen PMI ist im Wesentlichen auf die eben genannte Komplex - Methode zu verweisen. Die temperaturbasierten Methoden, die im frühen PMI zur Todeszeitschätzung herangezogen werden, basieren im Gegensatz dazu auf der Ableitung von verschiedenen Temperaturwerten, und umfassen z. B. das Verfahren nach HENSSGE (siehe unten). Die Leichenabkühlung beschreibt hierbei eine typische Leichenkühlkurve mit charakteristischem, sigmoidalem Verlauf (siehe Abbildung 1.1). Die tiefe Rektal- bzw. Körperkerntemperatur befindet sich dabei zu Beginn in einer konstanten Plateauphase, bevor die eigentliche lineare Leichenabkühlung beginnt. In der Endphase der Abkühlung beschreibt die Kühlkurve mit voranschreitender Abnahme der Kurvensteigung einen annähernd asymptotischen Verlauf.

Auf die Abkühlung haben verschiedene Faktoren Einfluss:

- Umgebungstemperatur
- Körpertemperatur zu Beginn der Kühlung (= zum Zeitpunkt des Todes)
- Körpergewicht
- Konstitution / Körperproportionen
- Umgebungsbedingungen (Bedeckung, Luftbewegung und Feuchtigkeit)
- thermische Eigenschaften der Aufliegefläche

Bei den temperaturbasierten Verfahren reicht die Komplexität der verwendeten Algorithmen von einfachen Faustregeln (Rules of Thumb I und II) [29, 42], bis hin zu komplexen, mehrstufigen Verfahren nach AL ALOUSI [2, 3] oder GREEN und WRIGHT [17]. Die Verfahren nach NELSON [34], PROCTOR [38] und FIDDES und PATTEN [14] benötigen im Gegensatz zu den vorher genannten Methoden mehrere zu verschiedenen Zeitpunkten abgeleitete Rektaltemperaturen zur Todeszeitschätzung. MALL et al. entwickelten mit ihrer FEM (Finite Elemente Methode) die Möglichkeit der virtuellen Darstellung der Leichenabkühlung. Hierbei meint der Begriff Finite Elemente, dass eine begrenzte Anzahl an Elementen zur Abbildung eines Objekts verwendet wird. Diese können verschiedene physikalische Eigenschaften annehmen (z. B. Wärmeleitfähigkeit). Virtuelle, computergestützte Crash - Tests aus der Automobilindustrie basieren ebenfalls auf dem Prinzip der Finiten Elemente. Zum Abgleich mit Vergleichsfällen steht eine institutseigene Datenbank zur Verfügung, wobei durch Verwendung einer Wärmebildkamera der gesamte Vorgang nach Leichenkühlung aufgezeichnet wurde und somit die Todeszeit bekannt ist. [24, 33]. Bislang ist die Methode besonders im Rahmen der Grundlagenforschung von Relevanz. KALISZAN und HEJNA formulierten einen Methodenansatz, der die Abkühlung rein auf Grundlage des NEWTON'schen Abkühlgesetzes mathematisch abbildet. Hierzu wurden erstmalig Schweinekadaver, als biologisches Modell, für Abkühllexperimente genutzt. [26]. Zusammenfassend hat bis zum heutigen Zeitpunkt keine der dargestellten Methoden Eingang in die rechtsmedizinische Routinearbeit gefunden.

Aktuell wird in der Praxis als Goldstandard die Nomogramm - Methode (NM) nach HENSSGE, basierend auf den Arbeiten der Mathematiker MARSHALL und HOARE, zur Todeszeitschätzung verwendet. Dessen zweitermiger Algorithmus (siehe Formel: 1.1) schaffte dabei in den 1960er Jahren die erste mathematische Abbildung der Leichenabkühlung.

$$\frac{(T_{(t)} - T_{(a)})}{(T_{(0)} - T_{(a)})} = \alpha \cdot \exp^{-\beta \cdot t} \cdot -\gamma^{\delta \cdot t} \quad (1.1)$$

$\alpha$  und  $\beta$  bilden hierbei die Längen der Plateauphase ab,  $\gamma$  und  $\delta$  bilden weitere wichtige Faktoren (z. B. Körpergewicht, Körperoberfläche und Proportionen einer Leiche) ab. Diese Faktoren sind allerdings schwierig am Leichenfundort zu bestimmen, sodass die Methode in der Praxis nie angewendet wurde. Durch HENSSGE erfolgte daraufhin in den späten 1970er- und frühen 1980er - Jahren eine Vereinfachung der zweitermigen Formel durch Generalisierung der verschiedenen Kühlfaktoren. Eine mathematische Auflösung der Formel nach HENSSGE ist nicht möglich, weswegen zur Ermittlung des Zielwertes (=Todeszeitintervall) ein iteratives Lösungsverfahren (Darstellung als

Nomogramm - daher auch der Name „Nomogramm - Methode bzw. NM“) notwendig wurde. Die experimentelle Grundlage hierfür boten 53. Abkühlexperimenten an Leichendummies.

$$\frac{T_{(r)} - T_{(a)}}{37,2 - T_{(a)}} = A \cdot \exp(B \cdot t) \cdot \exp\left(\frac{A \cdot B}{A - 1} \cdot t\right) \quad (1.2)$$

$$; B = -A \cdot (vBW^{-0,625}) + 0,284$$

Es ergab sich folgende Formel mit der Rektaltemperatur als  $T_{(r)}$ , Umgebungstemperatur als  $T_{(a)}$ , der zum Todeszeitpunkt angenommene Rektaltemperatur ( $T_{(r@D)} = 37,2 \text{ } ^\circ\text{C}$ ) und den Tatortbedingungen (dargestellt in Form der Korrekturfaktoren (siehe unten)). Für die Konstante „A“ zeigte sich, dass diese für verschiedene Umgebungstemperaturen (unterhalb von  $23,2^\circ\text{C} = 1,11$ , oberhalb =  $1,25$ ) unterschiedliche Werte annimmt. Für die Umgebungstemperaturen über  $23,2^\circ\text{C}$  dienten HENSSGE die von DE SARAM gesammelten Daten als Grundlage. [40] Für Konstante „B“ zeigten sich eine Abhängigkeit vom Körpergewicht der Leiche und eine hohe Korrelation zu dem Wert  $-0,625$ . Dieser dient als Skalierungsfaktor für Körperdimensionen und -gewichte im Rahmen der allometrischen Skalierung nach RUBNER und MEEH [32, 39]. „t“ entspricht hierbei der zu berechnenden Todeszeit.

Auf der linken Seite der Gleichung ist die relative Abkühlung „Q“ dimensionslos aufgetragen. Diese kann dabei einen Wert von 0 (vollständige Angleichung von Rektal- und Umgebungstemperatur) bis 1 (keine Abkühlung) annehmen, und berechnet sich über Verrechnung der vorliegenden Rektaltemperatur, Umgebungstemperatur und der zum Todeszeitpunkt angenommenen Rektaltemperatur. Die rechte Seite bildet dabei das virtuelle Körpergewicht ab, das aus einer Verrechnung der Korrekturfaktoren mit dem Realgewicht der Leiche entsteht.

Zur Abbildung von Umgebungsbedingungen am Leichenfundort (z. B. Bedeckung einer Leiche, Lageort), bedient sich die Methode über die Einführung der sogenannten Korrekturfaktoren (CF) eines Kunstgriffes. Faktoren, die die Leichenabkühlung beschleunigen, werden hierbei mit der Annahme eines leichteren Leichengewichts gleichgesetzt. Faktoren, die die Abkühlung verlangsamen (Bedeckung mit einer oder mehreren Lagen) werden der inneren Logik entsprechend, mit einem schwereren Leichengewicht gleichgesetzt. Dies wird über die CF erreicht, die mit dem Realgewicht der Leiche verrechnet werden<sup>4</sup>. Unverändert bleibt das Körpergewicht unter sogenannten Stan-

<sup>4</sup> Umgangssprachlich kühlt der Leichnam somit unter bestimmten Bedingungen (z. B. Luftzug, Feuchtigkeit) ab, „als wäre er leichter, als er es eigentlich ist“. Unter anderen Bedingungen (z. B. Bedeckung) kühlt der Körper so ab, als wäre er „schwerer, als er es eigentlich ist“.

dardabkühlbedingungen ( $CF = 1$  entspricht indifferenter Auflagefläche, Rückenlage, keiner Wasser- und Luftbewegung, unbedeckter Leichnam). Im Extremfall (fließendes Gewässer) kann ein  $CF$  einen minimalen Wert von 0,6 annehmen. Bei extremer Bedeckung (drei schwere Bettdecken) kann ein  $CF$  einen Wert von über 2,5 annehmen. Die allgemeine Formel zur Berechnung der  $CF$  lautet hierbei:

$$CF = \frac{bw(real)}{bw(calc)} \quad (1.3)$$

Gleichbleibende Korrekturfaktoren (z. B. eine Bedeckung mit einer Bettdecke) weisen bei unterschiedlichen Körpermassen bzw. Körperproportionen einen unterschiedlichen Effekt auf, sodass bei der Skalierung der  $CF$  gewisse Besonderheiten zu beachten sind:

Zum Beispiel weist eine Bettdecke in Relation zu einem Kinderkörper einen größeren kühlungsmindernden Effekt auf, als bei der Bedeckung eines ausgewachsenen, adipösen Leichnams. Daher ist in [18] eine Formel zur Skalierung der  $CF$ , ausgehend von einem 70 kg schweren Leichnam, formuliert worden.

$$\left[ \frac{-1.2815}{(BW^{-0.625} - 0.028) \cdot (-3.2 \cdot \exp^{-0.899959 \cdot CF_{70}}) - 0.0354} \right]^{1.6} = cCF \quad (1.4)$$

$C_{70}$  stellt hierbei den „nativen“  $CF$  (ermittelt für 70 Kilogramm (kg)) dar,  $cCF$  entsprechend den korrigierten  $CF$ . Zur Veranschaulichung und einfacheren Nutzung am Leichenfundort erfolgte die Zuordnung des ursprünglichen  $CF$  zum korrigierten  $CF$  für verschiedene Realgewichte ( $rbw$ ) über die Auftragung in einer Tabelle. Eine Verwendung dieser Tabelle führt indes zwangsläufig zu Rundungsfehlern. Eine detaillierte Berechnung bzw. Verwendung des Updates des Nomogramms wird daher empfohlen, um eine Erhöhung des Gesamtfehlers zu vermeiden. [36].

In Einzelfällen, wurde versucht verschiedene Auffindeszenarien von Leichen zu untersuchen, die bis zu diesem Zeitpunkt noch nicht mittels der Korrekturfaktoren abgebildet werden konnten. Ziel hierbei war es unter anderem von ALTHAUS neue Korrekturfaktoren zu etablieren und damit die Tabelle nach HENSSGE zu erweitern. Hierbei untersuchte ALTHAUS beispielsweise, wie sich verschiedene Bedeckungsszenarien mit trockenem bzw. feuchtem Laub an einem im Wald gelegenen Leichenfundort auf die Abkühlung einer Leiche auswirken. [5].

Neben der Ermittlung der konkreten Faktoren für die Formel nach MARSHALL und HOARE, sowie der graphischen Umsetzbarkeit (Nomogramme) und Adaptierbarkeit an Tatortbedingungen besteht eine weitere große Errungenschaft der Arbeiten nach HENSSGE darin, dass

die Angabe statistischer Benchmarks erfolgte: Für die jeweils ermittelten Erwartungswerte sind dann abhängig von der relativen Abkühlung „Q“ Intervallgrenzen definiert worden. Diese Intervallgrenzen betragen minimal  $\pm 2,8$  Stunden (h) in einem frühen Stadium der Abkühlung ((unabhängig davon ob CF verwendet werden). Bei weiterem Voranschreiten der Abkühlung nehmen diese Intervallgrenzen in ihrer Breite bis auf maximal  $\pm 7,0$  h zu (bei Verwendung von CF) im Bereich von  $Q = 0,3$  bis  $0,2$ .<sup>5</sup> Weiterhin sind diese abhängig von der Verwendung von Korrekturfaktoren oder deren Abwesenheit bei Standardkühlbedingungen ( $CF = 1$ ). Für die Nomogramme wird eine Wahrscheinlichkeit von 95 Prozent (entsprechend  $1,96$  Standardabweichungen (SD)) angegeben, wobei diese eigentlich 95,45 Prozent (entsprechend  $2$  SD) entspricht. Ein solches Intervall kann z. B. durch die Komplex - Methode (siehe oben), sowie durch nichtmedizinische Einschränkungen in bedingten Wahrscheinlichkeitsverteilungen weiter eingegrenzt werden [7, 23].

In der praktischen Fallarbeit mit der Nomogramm-Methode ergeben sich verschiedene Problemfelder. Zum Beispiel wird innerhalb des Verfahrens nach HENSSGE eine hinreichend konstante Umgebungstemperatur ( $T_{(a)}$ ) angenommen, die jedoch in der realen Fallarbeit nur selten vorliegt. Häufig kommt es in der Realität am Leichenfundort vielmehr zu Schwankungen der Umgebungstemperatur z. B. im Rahmen des Tag - Nacht - Rhythmus, der Verbringung der Leiche in die Kühlung, Öffnung der Fenster eines zuvor geschlossenen Raumes durch Ermittlungsbehörden oder auch der Erwärmung durch Ausleuchtung des Leichenfundortes im Rahmen der Spurensicherung [9]. Die plötzliche Erhöhung der  $T_{(a)}$  wurde durch BISEGNA untersucht. Er versuchte einen Verzögerungsfaktor, in die dem Verfahren nach HENSSGE zugrundeliegende Formel zu integrieren [8]. Die plötzliche Erniedrigung der  $T_{(a)}$  wurde von ALTHAUS untersucht [4]. Bis heute ist es allerdings trotz einiger Versuche auf diesem Gebiet nicht möglich, auf bekannte Temperaturveränderungen bzw. -schwankungen der  $T_{(a)}$  innerhalb der Nomogramm - Methode so zu reagieren, dass die Realität abgebildet ist.

Ebenfalls ist es innerhalb der Formel nach HENSSGE nicht möglich auf eine erhöhte  $T_{(r@D)}$  (selbst wenn deren Erhöhung zum Todeszeitpunkt bekannt ist) zu reagieren bzw. diese innerhalb des Nomogramms abzubilden. Häufige Ursachen für eine Erhöhung der Reaktaltemperatur zum Todeszeitpunkt sind im rechtsmedizinischen Alltag z. B. das Vorliegen eines Schädel-Hirn-Traumas mit Verletzung der Hirnmasse oder Fieber im Rahmen von Infektionen oder Into-

<sup>5</sup>  $Q = 1,0$  bis  $0,5$  entspricht  $\pm 2,8$  h ohne bzw. mit CF ;  $Q = 0,5$  bis  $0,3$  entspricht  $\pm 3,2$  h ohne CF bzw.  $\pm 4,5$  h mit CF ;  $Q = 0,3$  bis  $0,2$  entspricht  $\pm 4,5$  h ohne CF bzw.  $\pm 7,0$  h mit CF.

xikationen mit Drogen oder Medikamenten). Die Problematik lässt sich darüber erklären, dass innerhalb der Formel nach HENSSGE eine  $T_{(r@D)}$  von  $37,2^{\circ}\text{C}$  als Standardkörpertemperatur angenommen wird und dieser Wert nicht variabel an etwaige Gegebenheiten (z. B. Unterkühlung oder Fieber) angepasst werden kann.

Auch die Auswahl des richtigen Korrekturfaktors für jedes Tatortzenario ist problembehaftet. Da die Tabelle der cCF von HENSSGE nur eine gewisse Anzahl an beschriebenen Bedingungen für bestimmte Gewichte (Auftragung in 10- bis 20 kg Schritten) enthält, kann nicht jeder Leichenfundort auf diese Weise über das Prinzip der CF abgebildet werden. Dies führt dazu, dass die korrekte Auswahl der CF sehr eng an die rechtsmedizinische Fachkenntnis und Erfahrung des am Leichenfundort anwesenden Rechtsmediziners gekoppelt ist. Häufig kann es so zu einer Fehleinschätzung des vorliegenden PMI mit im schlimmsten Fall einer Irreleitung der Ermittlungsarbeit kommen.

Ebenfalls ist nicht untersucht, wie z. B. Säuglinge, Kinder oder Jugendliche, die andere Körperproportionen als ein Erwachsener aufweisen, in der Nomogramm - Methode zu behandeln sind. Weiterhin erweisen sich auch sogenannte „broken experiments“ als problematisch, da in ihnen nach einer gewissen Zeit die Abkühlbedingungen verändert werden. Eine Verrechnung verschiedener Korrekturfaktoren oder die Annahme von unterschiedlichen Korrekturfaktoren zu unterschiedlichen Phasen der Abkühlung sind innerhalb des Nomogramms nicht möglich. Beispielhaft lässt sich hierbei das Zudecken eines Leichnams nach Auffinden durch Angehörige oder medizinisches Personal anführen, nachdem dieser einige Stunden unbedeckt abgekühlt war.

Auch HENSSGE summiert folgende Forschungsperspektive:

Wäre es möglich, eine direkte CF-Bestimmung in vereinfachter Form durchzuführen oder vom Prinzip der Korrekturfaktoren abzukommen, wäre dies eine wichtige Verbesserung der NM [30].

Durch die Arbeit von KANAWAKU et al. konnte der Einfluss von Rundungsfehlern auf die Genauigkeit der NM durch Herausarbeiten einer charakteristischen, systematischen Fehlerverteilung belegt werden. Ursächlich hierfür ist vor allem die niedrige Auflösung der am Leichenfundort verwendeten Leichenthermometer. Da eine höhere Auflösung der Tatortthermometer oder Erhöhung der Anzahl an Messungen allein nicht zielführend wären, könnten z. B. die Verwendung eines „Smoothing - Filters“ und mehrfachen Messungen der  $T_r$  zur Vermeidung von Rundungsfehlern sinnvoll sein. Beide Tools wurden bis zum heutigen Tag nur oberflächlich bzw. nicht im Bezug auf die Todeszeitschätzung verwendet und / oder auf ihren Nutzen untersucht [27] [28].

Auch schon in früheren Experimenten wurde versucht, ein adäquates biologisches Modell (= Leichenersatz) für Kühlexperimente zu finden. In den von KALISZAN durchgeführten Abkühlexperimenten am Schwein hatte sich dieses als geeignet erwiesen (siehe oben). Was dabei aber außer Acht gelassen wird, ist der Umstand, dass bis heute noch nicht klar ist, wie Schweine aufgrund ihrer vom Menschen abweichenden Proportionen (dünne, kleine Beine und ein massiger Torso mit massigem Kopf) innerhalb der NM zu behandeln sind [26].

#### 1.1 SICHER ERGEBENDE FRAGESTELLUNGEN

Damit ergeben sich folgende Fragestellungen:

- Ist es möglich, eine Methode auf Grundlage der NM zu etablieren, die frei von subjektiven Annahmen (z.B. Korrekturfaktoren) ist?
- Ist es möglich, über eine Methode Falschannahmen zur Umgebungstemperatur und Rektaltemperatur zum Todeszeitpunkt zu detektieren und ggf. zu korrigieren?

Teil II

METHODIK



Die Methode beruht im Wesentlichen darauf, dass über das sogenannte Bruteforcing die in Ansatz gebrachten Parameter der NM-Methode anhand von Kühldaten überprüft werden. Bruteforcing (BF), auch „Methode der Erschöpfung aller Möglichkeiten“, wird z. B. zum „Knacken“ eines Passwortes durch „Ausprobieren“ aller Möglichkeiten verwendet. Ein einfaches Beispiel hierfür ist ein Zahlenschloss, in das alle möglichen Kombinationen eingegeben werden, bis sich das Schloss öffnet. In der Mathematik kann Bruteforcing unter Anderem zur Auflösung von Gleichungssystemen verwendet werden.

Die Nomogramm-Methode (NM) zur Todeszeitschätzung kann hierbei ebenfalls als solches Gleichungssystem gelten. Hierbei werden neben der allgemeinen Kurvenform auch Parameter in Ansatz gebracht, die teilweise nur näherungsweise dargestellt bzw. generalisiert angenommen werden.

Bei der Anwendung des BF auf die NM ist dementsprechend das Ziel (der Erfolg) nicht das Öffnen eines Schlosses, sondern das Herleiten einer konstanten, über den zeitlichen Verlauf gleich bleibenden *absoluten Todeszeit* (z. B. 13:00 Uhr). Im Ergebnis der NM wird stets jedoch nur eine *relative Todeszeit* (z. B. 9 h vor Messung) berechnet. Diese *relative Todeszeit* verändert sich daher im zeitlichen Verlauf der Abkühlung.

Beispiel:

Die *absolute Todeszeit* sei 5:00 Uhr.

Für eine Messung um 13:00 Uhr ergibt sich dadurch diesbezüglich eine *relative Todeszeit* von 8 h („8 h vor Messung“). Für einen Messzeitpunkt von 14:00 Uhr ergibt sich entsprechend eine *relative Todeszeit* von 9 h bei gleich bleibender *absoluter Todeszeit* (5:00 Uhr). Der Zeitpunkt des Todes (*absolute Todeszeit*) bleibt somit auch über den Verlauf der Zeit konstant. Dementsprechend muss sich die *relative Todeszeit* über den Verlauf der Zeit verändern.

Es muss ebenfalls unterstellt werden, dass sich eine solche Konsistenz der *absoluten Todeszeit* nur erreichen lässt, wenn ein korrekter Parametersatz (siehe 1.2) bestehend aus  $T_{(a)}$ ,  $T_{(r@D)}$  und dem korrekten Wert für Faktor A in Ansatz gebracht wird. Umgekehrt kann wiederum aus der Konstanz der *absoluten Todeszeit* (bzw. korrekten Veränderung der *relativen Todeszeit* über den zeitlichen Verlauf der Kühlung)

auf einen korrekten Parametersatz geschlossen werden. Für diese Parameter wäre die Korrektheit dann nicht nur anzunehmen (z. B. begründet durch eine Liste an Korrekturfaktoren oder durch meteorologische Informationen über  $T_{(a)}$ ), sondern ihre Korrektheit könnte als bewiesen gelten.

Aus der Formel 1.2 ergeben sich verschiedene Parameter, die einem solchen Parametersatz zugehörig sind. Die NM setzt hierbei als  $T_{(r@D)}$  einen Wert von  $37,2\text{ °C}$  an und ermöglicht keine weitere Anpassung dieses Wertes. Die  $T_{(a)}$  wird in der NM ebenfalls als hinreichend konstant angenommen. Weiterhin ist Faktor A mit unterschiedlichem Wert für eine  $T_{(a)}$  von unter bzw. über  $23,2\text{ °C}$  anzunehmen. Es verbleibt hiermit jedoch als hoch subjektive Schätzung das virtuelle Körpergewicht ( $vBW$ ). Dieses sollte hierbei, wenn sich die Abkühlbedingungen nicht ändern, ebenfalls über die Zeit konstant bleiben. Hierbei besteht ein Unterschied zwischen dem in der NM verwendeten  $vBW$  und dem in der BF-Methode verwendeten Kühlgewicht ( $\text{cooling weight} = cw$ ).

In der NM geht HENSSGE davon aus, dass eine Leiche unter Standardkühlbedingungen exakt ihrem realen Körpergewicht ( $rw!$ ) entsprechend abkühlt (z. B.  $100\text{ kg}$  Realgewicht entsprechen  $100\text{ kg}$  virtuellem Körpergewicht). Treten nun Umgebungsbedingungen hinzu, welche die Abkühlung relativ dazu beschleunigen oder verlangsamen, so wird dies über den sogenannten Korrekturfaktor ausgedrückt. Da Leichen mit einem niedrigeren Gewicht schneller abkühlen, als Leichen mit einem höheren Gewicht werden folglich für Abkühlbedingungen, die die Abkühlung beschleunigen,  $CF < 1$  in Ansatz gebracht (z. B. ein  $CF$  von  $0,8$  bei Luftbewegung = virtuelles Körpergewicht von  $80\text{ kg}$  bei einem Realgewicht von  $100\text{ kg}$ ). Entsprechend führen Kühlbedingungen, die die Abkühlung verlangsamen über einen  $CF > 1$  zu einem höheren, angenommenen  $vBW$  (z. B. ein  $CF$  von  $1,3$  bei Bedeckung mit mehreren Lagen Textil = virtuelles Körpergewicht von  $130\text{ kg}$  bei einem Realgewicht von  $100\text{ kg}$ ).

Die NM nach HENSSGE berücksichtigt hierbei jedoch nicht, dass für die Leichenabkühlung vorrangig der Torso in Ansatz zu bringen ist. HENSSGE unterstellt somit, dass für Personen mit dem selben Realgewicht stets der gleiche Torso in Ansatz zu bringen ist. Es ist jedoch naheliegend, dass allein aufgrund der Körperproportionen nicht jeder Leichnam eines bestimmten Realgewichts auch analog des von HENSSGE unterstellten Torsos abkühlt.

Mit anderen Worten:

Nicht jede  $100\text{ kg}$  schwere Leiche muss unter Standardbedingungen wie ein in der NM angenommener  $100\text{ kg}$  schwerer Leichnam abküh-

len. Bildlich vor Augen geführt würde beispielsweise das Abtrennen eines Beines im Rahmen einer kriminellen Verstümmelung zwar zu einer deutlichen Veränderung des realen Körpergewichts, jedoch nicht zu einer Änderung des Kühlverhaltens des Torsos (festgemacht an der Veränderung der tiefen Rektaltemperatur) führen.

Die BF-Methode postuliert daher das sogenannte Kühlgewicht ( $cw$ ). Dieses inkorporiert alle Einflüsse der Umgebungsbedingungen, der Körperproportionen sowie weitere Einflüsse auf das Kühlverhalten und fasst diese dementsprechend zusammen. Es ist daher plausibel und anzunehmen, dass die BF-Methode aus dem Kühlverhalten eines Leichnams, Kühldummies oder auch Schweins Kühlgewichte ermittelt, welche über die NM nicht abgebildet werden können.

Es muss an dieser Stelle besonders noch einmal darauf hingewiesen werden, dass die NM keine Möglichkeit bietet, um bekannte Veränderungen (Abtrennen eines Oberschenkels, unbekannte Abweichungen des Kühlverhaltens, z. B. veränderte Proportionen eines Schweins mit länglichem Oberkörper und kurzen Beinen) abzubilden.

Zusammengefasst versucht die Bruteforcing - Methode dementsprechend Antworten auf die folgenden Fragen zu finden:

Für welches Kühlgewicht gilt, dass die *absolute Todeszeit* (= die tatsächlich berechnete Uhrzeit) konstant über den Erwartungswert zu berechnen ist? Für welche Parameter ändert sich die entsprechende *relative Todeszeit* über den Verlauf der Kühlkurve kontinuierlich und zutreffend?

## 2.1 PROOF OF CONCEPT

Zur grundsätzlichen Prüfung („Proof of Concept“) des Bruteforcing-Ansatzes sollte dieser zunächst auf „ideale Kühlkurven“, welche vollständig den in der Formel 1.2 genannten Gesetzmäßigkeiten folgen, angewandt werden. Diese Kühlkurven (Veränderung der  $T_{(r)}$  über die Zeit) können hierbei durch einfache Umstellung der Formel 1.2 von HENSSGE ermittelt werden.

$$T_{(r)} = \left[ \left( A \cdot \exp(B \cdot t) \cdot \exp\left(\frac{A \cdot B}{A - 1} \cdot t\right) \cdot (37.2 - T_{(a)}) \right) + T_{(a)} \right] \quad (2.1)$$

$$; B = -A \cdot (vBW^{-0.625}) + 0.284$$

Durch die Umstellung kann dann für definierte Parametersets, bestehend aus  $vBW$ ,  $T_{(a)}$  und  $T_{(r@D)}$ , über die veränderte Todeszeit „ $t$ “  $T_{(r)}$  berechnet werden. Es können so auf einfache Art und Weise „ideale Kühlkurven“ modelliert werden, auf welche daraufhin der BF - Ansatz angewendet wird. Die auf diesem Weg festgestellte Gleichung

2.1 wurde daraufhin in ein selbst geschriebenes Skript in der Programmiersprache „PYTHON“ überführt [43, 44], welches die „ideale Kühlkurve“ mit den dazugehörigen Zeitstempeln und Rektaltemperaturen in einer csv (comma separated value)-Datei abspeicherte. Hierbei konnten nicht nur die verwendeten  $T_{(a)}$  (5 °C, 10 °C, 15 °C) und das verwendete vBW (50 kg, 100 kg, 150 kg), sondern auch zusätzlich die angenommene  $T_{(r@D)}$ , variiert werden. Somit war es möglich auch „ideale Kühlkurven“ für fieberhafte Zustände (z. B. mit einer  $T_{(r@D)}$  von > 38 °C) zu modellieren.

In einem weiteren Skript („Henssge-Skript“), ebenfalls geschrieben in der Programmiersprache „PYTHON“, wurden daraufhin die vorausgesetzten Parameter ( $T_{(a)}$ ,  $T_{(r@D)}$ ) eingetragen. Hierbei ergibt sich der Faktor A analog zur Formel 1.2 aus der vorliegenden  $T_{(a)}$ . Das Henssge-Skript liest dann aus der zuvor erstellten csv-Datei für einen bekannten Zeitpunkt einen  $T_{(r)}$ -Wert aus. Aus diesem Wert für  $T_{(r)}$  wird dann in Kombination mit den weiteren angenommenen Parametern über eine geschriebene Funktion innerhalb des „Henssge-Skripts“ ein Erwartungswert berechnet. Variiert wird hierbei lediglich das anzunehmende cw:

Dieses wird dabei über eine sogenannte „for-Schleife“ kleinschrittig in 0,1 kg Schritten von einem minimalen Wert von 20,0 kg bis zu einem maximalen Wert von 250,0 kg iteriert. Es ergibt sich somit eine Vielzahl von Erwartungswerten für eine eben so große Vielzahl von Kühlgewichten.

Diese Berechnungen werden dann für die entsprechende  $T_{(r)}$  in einem definierten „BF-Intervall“ (15-, 30- oder 60-Minuten) nach dem ersten Wert erneut durchgeführt. Auch hier werden die gleichen Parameter (wie in der Berechnung zuvor) mittels einer Funktion auf den vorliegenden  $T_{(r)}$ -Wert angewendet. Auch hier findet dementsprechend eine kleinschrittige Iteration des Kühlgewichts statt.

Im letzten Schritt wird dann für jedes Kühlgewicht der vorliegende Erwartungswert mit einem weiteren, später vorliegenden Erwartungswert in zeitlicher Differenz (ein BF-Intervall später) ins Verhältnis gesetzt. Es wird dann das Kühlgewicht als „korrekt“ akzeptiert, für welches dieses Verhältnis ein Minimum erreicht.

Mit anderen Worten stellt das „Henssge-Skript“ hierbei folgende Fragen:

Für welches Kühlgewicht aus einer Vielzahl von Kühlgewichten bleibt der Erwartungswert über die Zeit gleich, wenn man die zeitliche Differenz berücksichtigt? Für welches Kühlgewicht gilt also möglichst präzise, dass zum Zeitpunkt der ersten Berechnung der Erwartungswert X (z. B. 8 Stunden) und das entsprechende BF-Intervall (z. B.

1 Stunde) später der Erwartungswert  $X_{+1}$  (z. B. 9 Stunden) beträgt (siehe Abbildung 2.5)?

Nachdem das zu diesem Zeitpunkt der Abkühlung als „korrekt“ anzunehmende Kühlgewicht ermittelt wurde (daher auch momentanes Kühlgewicht =  $mCW$ ) wird dieses inklusive des dazugehörigen Zeitstempels in eine csv - Datei übertragen. Mit der nächsten  $T_{(r)}$  zum darauffolgenden Zeitpunkt wird dann in derselben Art verfahren. Am Ende des „Henssge-Skripts“ liegt dementsprechend eine Vielzahl von momentanen Kühlgewichten vor, welche in Abhängigkeit von der Zeit in Form einer sogenannten Kühlgewichtskurve (cooling weight curve =  $CWC$ ) aufgetragen werden (siehe Abbildung 2.5).

Für die „idealen Kühlkurven“ wäre es daher logisch, die entsprechenden Kühlgewichtskurven ( $CWC$ ) als horizontale Linie zu erwarten, welche korrekt das momentan angenommene Kühlgewicht abbildet. Jedoch können bei bekannten korrekten Parametern versuchsweise auch inkorrekte Parameter angenommen werden, um deren Auswirkung auf die Form der  $CWC$  zu untersuchen. Hierbei ist es beispielsweise von Interesse zu untersuchen, wie sich eine fälschlich als zu hoch bzw. zu niedrig angenommene  $T_{(a)}$  auf die Form der  $CWC$  auswirkt. Auch kann anhand einer für eine erhöhte  $T_{(r@D)} > 37,2$  °C erstellten Kühlkurve ermittelt werden, wie sich die Fehlannahme einer normalen  $T_{(r@D)}$  auswirkt. Die Proof of Concept-Berechnung dient folglich nicht nur dazu, ein funktionstüchtiges Auswertungsskript zu etablieren, sondern auch dazu, anhand „idealer Kühlkurven“ definierte Fehlannahmen und deren Auswirkungen zu ermitteln. Zu den Ergebnissen dieser Versuche (siehe Ergebnisteil).

Die so entwickelten „PYTHON-Tools“ konnten auch bei der Berechnung am Kühldummy und am biologischen Modell „Schwein“ eingesetzt werden, wobei hier der zusätzliche Einsatz eines Glättungsfilters (z. B. Sawitzky-Golay-Filter) notwendig war.

## 2.2 KÜHLDUMMIES UND MESSEINHEITEN

Analog zu den Versuchen von HENSSGE zur Ermittlung der CF, die dieser an tonnenförmigen Kühldummies (siehe Tabelle 2.1) durchführte, wurden zehn eigene Kühldummies hergestellt. Die tonnenförmige Form entspricht hierbei den Proportionen eines menschlichen Torsos, in dem während der Abkühlung der meiste Wärmeverlust stattfindet (siehe Abbildung 2.1). Das Realgewicht der hergestellten Kühldummies betrug hierbei zwischen minimal 5,9 kg und maximal 26,9 kg (siehe Tabelle 2.2).

Für die Außenhülle wurden sogenannte „dry bags“<sup>1</sup> mit einer zusätzlichen Ummantelung aus selbstklebender Verpackungsfolie („Cling-

<sup>1</sup> Wasserdichte zylindrische Taschen, die im Wassersport und für andere Outdoor-Aktivitäten verwendet werden.

| Gewicht  | mittl. Radius | <sup>(v)</sup> BW |
|----------|---------------|-------------------|
| 0,7 kg   | 42,8 cm       | 6,9 kg            |
| 1,02 kg  | 49,6 cm       | 14,3 kg           |
| 2,82 kg  | 67,8 cm       | 17,3 kg           |
| 3,35 kg  | 78,1 cm       | 32,8 kg           |
| 8,20 kg  | 110,9 cm      | 36,8 kg           |
| 10,00 kg | 115,6 cm      | 38,0 kg           |
| 21,8 kg  | 152,9 cm      | 64,8 kg           |
| 22,00 kg | 152,9 cm      | 66,5 kg           |
| 27,50 kg | 161,2 cm      | 72,5 kg           |
| 24,00 kg | 162,3 cm      | 72,4 kg           |
| 25,00 kg | 162,3 cm      | 76,5 kg           |
| 31,00 kg | 177,0 cm      | 67,0 kg           |

Tabelle 2.1: Überblick über die von HENSSGE hergestellten Dummies und ihre Maßzahlen. Die Ummantelung der Dummies bestand auf 0,5 mm dickem PVC beschichtetem Material oder 0,5 mm dickem PVC. Nur der Kühldummy in der letzten Zeile der Tabelle war mit 1,5 mm Kautschuk ummantelt.

| Name   | Gewicht<br>(kg) | Umfang<br>(cm) | Länge<br>(cm) | Anzahl | Messzeit<br>(h) |
|--------|-----------------|----------------|---------------|--------|-----------------|
| 1a     | 11,8            | 62,0           | 40,0          | 15     | 386,1           |
| 1b     | 9,7             | 62,0           | 32,0          | 14     | 398,6           |
| 1c     | 6,8             | 54,0           | 28,0          | 15     | 375,9           |
| 2a     | 12,3            | 60,0           | 42,0          | 11     | 235,6           |
| 2b     | 8,6             | 61,0           | 27,0          | 13     | 256,5           |
| 2c     | 8,7             | 60,0           | 29,0          | 10     | 214,6           |
| 3a     | 26,9            | 93,0           | 39,0          | 12     | 388,8           |
| 3b     | 21,5            | 75,5           | 44,0          | 9      | 324,9           |
| 4a     | 8,5             | 60,0           | 30,0          | 12     | 210,2           |
| 4b     | 5,9             | 54,0           | 24,0          | 16     | 327,8           |
| n = 10 | -               | -              | -             | 127    | 130 Tage        |

Tabelle 2.2: Überblick über die verwendeten Kühldummies, deren Ausmaße bzw. Realgewichte, Experimentenanzahl und deren Messzeiten (helllila: leichte Dummies (unter 10 kg) ; hellblau = mittelschwere Dummies (10 bis 20 kg) ; marineblau: schwere Dummies (über 20 kg))

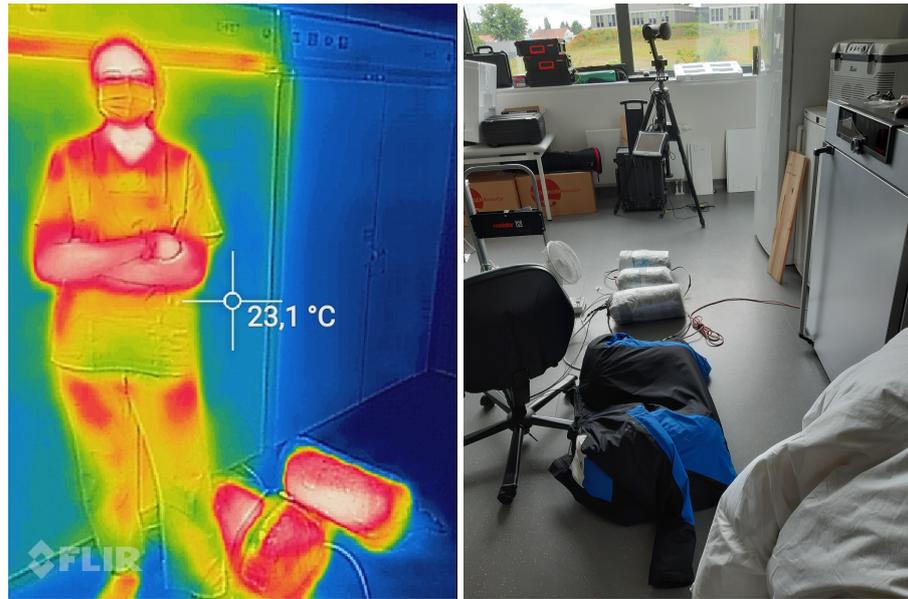


Abbildung 2.1: Linke Abbildung: Wärmebildaufnahme der erhitzten Kühldummies neben einem Menschen (Autorin dieser Arbeit). Rechte Abbildung: Abkühllexperimente in der experimentellen Rechtsmedizin unter Verwendung der „CF“ Winterjacke.

Film“) verwendet. Als Füllstoff für Kühldummy „4a“ (siehe Tabelle 2.2) wurde, wie in [30] vorgeschlagen, Wirodoube® duplizierendes Hydrokolloid [6] verwendet. Für die übrigen Kühldummies wurde eine Zubereitung aus Volumen: 47,5 % Wasser, 47,5 % Agar-Agar-Pulver und 5,0 % Glycerin verwendet, die ebenfalls in der Veröffentlichung [30] beschrieben wurde.<sup>2</sup>

Die Erwärmung der Kühldummies im Rahmen der Vorbereitung der Kühlexperimente erfolgte hierbei in Wärme- und Trockenschränken der Firmen Memmert (Modell Universalschrank UN 260 mit Fassungsvermögen von 256 Litern ([1]) und Ehret (Modell TK/L 4878 mit 1050 l Fassungsvermögen [13]) auf eine Zieltemperatur von 37,2°C. Für einige Experimente wurden die Kühldummies bewusst auf höhere Temperaturen erwärmt. Wie auch in den Experimenten (siehe Veröffentlichung [5]) von ALTHAUS und HENSSGE<sup>3</sup> war eine exakte Einstellung der Zieltemperatur auf 37,2°C nicht in allen Fällen möglich.

<sup>2</sup> Wir empfehlen die Verwendung eines Backofens (bzw. Wärmeschrankes oder ähnlicher Gerätschaften zur Erzeugung einer konstanten Wärme zum Schmelzen der verschiedenen Stoffkomponenten und deren Vermengung unter kontinuierlicher Rotationsbewegung und geringem Hitzeeinfluss.

<sup>3</sup> In diesen wurde eine Zieltemperatur im Bereich zwischen 36,0 und 38,0°C toleriert.

### 2.2.1 Raspberry Pi Mikrocomputer und Thermometersonden des Typ Ds18b20 zur Ableitung der Temperaturwerte

Die Ableitung der vorliegenden  $T_{(r)}$  und  $T_{(a)}$  erfolgte hierbei mit fest in den Kühldummies installierten Thermometersonden des Typs DS18B20 [25]. Diese decken hierbei einen Messbereich zwischen minimal  $-55\text{ °C}$  bis maximal  $+125\text{ °C}$  ab. Ihre Auflösung beträgt  $0,0625\text{ °C}$  (12-bit). Ihre Messgenauigkeit ist mit  $\pm 0,5\text{ °C}$  anzugeben. Die kleinen und mittelschweren Dummies erhielten (siehe Tabelle 2.2 eine zentral und eine peripher gelegene Thermometersonde. Die schweren Dummies (siehe 2.2) erhielten zusätzlich eine intermediär zwischen den anderen Sonden gelegene Thermometersonde. Hierdurch konnte vor Beginn der Abkühlexperimente die homogene Aufheizung der Kühldummies überprüft werden. Zur Bündelung der Thermometersonden erfolgte ihre Zusammenfassung im Rahmen der in Tabelle 2.2 beschriebenen Gruppen „leicht, mittelschwer und schwer“ über Steckverbindungen des Typs „male-female“.

Die Aufzeichnung der abgeleiteten  $T_{(r)}$  erfolgte daraufhin über einen Raspberry Pi Mikrocomputer Modell 3b [16]. Die gebündelten Thermometersonden wurden hierbei mit diesem über weitere Steckverbindungen des Typs „female“ über dessen General-Purpose Input/Output (GPIO)-Pin-Feld<sup>4</sup> (siehe Schaltplan in Abbildung: 2.2) verbunden.

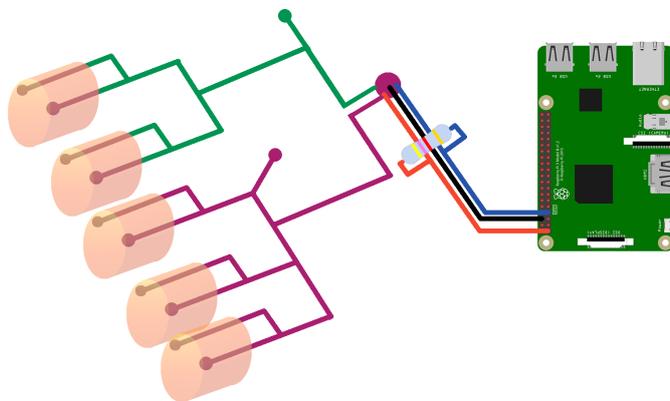


Abbildung 2.2: Schematische Darstellung der Verschaltung des Raspberry Pi Mikrocomputers Modell 3b mit angeschlossenen Dummies, Thermometersonden und  $T_{(a)}$  aufzeichnende Thermometersonden.

<sup>4</sup> Hierbei müssen entsprechend dem Verschaltungsplans drei GPIO-Pins mit unterschiedlichen Funktionen (Spannung, Masse (Ground) und Datenübertragung) mit den Thermometersonden verbunden werden. Zwischen dem Ground-Pin (schwarzbraun), und dem Daten-Pin (gelb) musste ein Pull-Up-Resistor (Widerstand) installiert werden, um die nötige Anzahl von Thermometersonden an den Raspberry Pi Mikrocomputer anschließen zu können. Der Pull-Up-Resistor sollte hierbei variabel sein, da sich der Widerstand mit zunehmender Anzahl der angeschlossenen Thermometersonden verändert.

Zur Aufzeichnung der Kühlkosten (gemessene  $T_{(r)}$  und der dazugehörigen Zeitstempel) wurde ein dezidiertes PYTHON-Skript [43, 44] erstellt. Dieses speicherte die Kühlkosten in Form einer csv-Datei auf dem Raspberry Pi Mikrocomputer ab.

Prinzipiell ist hierbei ein Batteriebetrieb mittels integriertem, wiederaufladbarem Akku möglich, wurde jedoch innerhalb der Experimente nicht verwendet. Ebenfalls gibt es die Möglichkeit eines Fernzugriffs über das Internet (per Secure Shell (SSH)), welcher jedoch ebenfalls nicht verwendet wurde.

### 2.3 DESIGN DER KÜHLEXPERIMENTE

Zur Darstellung verschiedener Umgebungsszenarien, in denen ein Leichnam in der Fundortarbeit aufgefunden wird, wurden verschiedene  $T_{(a)}$  simuliert. Verwendet wurden hierzu die Räumlichkeiten der Experimentellen Chirurgie (Tierversuchstrakt), die Räumlichkeiten der Experimentellen Rechtsmedizin (Blutspurenraum) und die Leichenkühlung der Rechtsmedizin. Für den Transport der erwärmten Kühldummies zum Ort des vorgesehenen Experiments wurden pauschal 15 Minuten, in Ausnahmefällen (Verbringung in die Leichenkühlung) auch 30 Minuten, angenommen. Für  $T_{(a)}$  wurden hierbei in den unterschiedlichen Räumlichkeiten folgende Werte angenommen:

- Experimentelle Chirurgie im Tierversuchstrakt (zwischen 22 und 25 °C)
- Experimentelle Rechtsmedizin im Blutspurenraum<sup>5</sup> (zwischen 15 und 22 °C)
- Leichenkühlung in den Räumlichkeiten der Rechtsmedizin (4 bis 8 °C)<sup>6</sup>
- Experimentelle Rechtsmedizin - Gefriertruhe (0 bis -14 °C)

### 2.4 ABKÜHLEXPERIMENTE AM KÜHLDUMMY

Es wurden über einen Zeitraum von insgesamt 12 Monaten mit den uns zur Verfügung stehenden zehn Kühldummies insgesamt 127 Abkühlexperimente, sowohl unter Standard- als auch unter angepassten

<sup>5</sup> Erzeugung einer konstanten Temperatur durch ein mobiles Klimagerät.

<sup>6</sup> Hier leider nur eingeschränkte Möglichkeit der Datengewinnung, da die Experimente aus infektiologischen Bedenken im Rahmen der Covid19 - Pandemie abgebrochen werden mussten. Es erfolgte jedoch eine spätere Ergänzung der Daten durch Verwendung einer Gefriertruhe (siehe nächsten Unterpunkt), mit der auch negative  $T_{(a)}$  erzeugt werden konnten.



Abbildung 2.3: Linke Abbildung: Versuchsaufbau eines Kühlversuchs am Kühldummy in der Leichenkühlung. Rechte Abbildung: Versuchsaufbau eines Abkühlversuchs verschiedener Kühldummies unter Verwendung verschiedener CF und bei Verwendung eines mobilen Klimageräts.

Kühlbedingungen, durchgeführt. Hierbei kam es zu zeitweiligen Unterbrechungen durch die Covid-19-Pandemie, die (wie oben erwähnt) auch zu einem Abbruch der Experimente in der Leichenkühlung bzw. deren Verlegung in die eigens dafür angeschaffte Gefriertruhe führte. Die gesamte Kühlzeit belief sich dabei auf etwa 130 Tage bzw. 3120 Stunden (siehe Tabelle 2.2). Hierbei muss angemerkt werden, dass die Anzahl an Experimenten mit den daraus abgeleiteten Kühlzeiten dabei deutlich höher lag als in den von HENSSE durchgeführten Studien zur Etablierung der CF.

Zunächst wurden die ersten Kühlversuche unter Standardbedingungen<sup>7</sup> und wechselnden  $T_{(a)}$  durchgeführt. In späteren Experimenten wurde dann von den Standardbedingungen abgewichen, wobei verschiedene Korrekturfaktoren untersucht wurden. Hierbei wurden sowohl Kühlbedingungen, die die Abkühlung verlangsamten als auch Kühlbedingungen, die die Abkühlung beschleunigen, simuliert. Die verwendeten  $CF < 1$ , die die Abkühlung beschleunigen, entsprechen hierbei:

- Bedeckung mit befeuchteter Kleidung (Operationskleidung)

<sup>7</sup> Unbedeckter („nackter“) Körper in Rückenlage auf thermisch indifferenten Oberflächen ohne Luftbewegung oder Feuchtigkeit.

- konstante Luftbewegung (erzeugt durch einen rotierenden Standventilator)

Die verwendeten  $CF > 1$ , die die Abkühlung verlangsamten, entsprachen hierbei:

- leichter Bekleidung / Bedeckung (Operationskleidung)
- dicker Bekleidung / Bedeckung (Winterjacke)
- Bedeckung mit Bettdecke (Steppdecke von IKEA)

Die zur Untersuchung der  $CF$  verwendeten Materialien bzw. Kleidungsstücke wurden hierbei so ausgewählt, dass sie durch ihre weltweite Verfügbarkeit und gleiche Produktionsstandards eine Reproduzierbarkeit der Abkühlversuche ermöglichen.

## 2.5 ABKÜHLEXPERIMENTE AM SCHWEIN

Zusätzlich zu unseren Abkühlversuchen am Kühldummy wurden daraufhin ergänzend weitere Experimente an biologischem Material durchgeführt. Hierfür wurden die Kühlkurven von 18 Schweinen mithilfe von mehreren Thermometersonden des Typs DS18B20 (siehe Abbildung: 2.4) aufgezeichnet. Diese waren im Rahmen von toxikologischen Untersuchungen zuvor getötet worden.<sup>8</sup> Eine Thermometersonde diente hierbei, wie auch in den Kühlversuchen am Dummy, der fortlaufenden Aufzeichnung der  $T_{(a)}$ . Für die Verbringung der Schweine vom Ort der Tötung in die Räumlichkeiten der Rechtsmedizin nahmen wir hierbei zwischen 30 Minuten und 1 h an, in denen keine Temperaturoaufzeichnung durch die Thermometersonden erfolgte.

16 Schweine kühlten hierbei unter den von HENSSGE definierten Standardbedingungen ab. Allein das Schwein 18 erhielt eine Bedeckung mit einer handelsüblichen Bettdecke (siehe Abbildung 2.4), um den entsprechenden  $CF$  nach HENSSGE zu untersuchen. Alle Schweine wiesen, sowohl zum Zeitpunkt des Todes, als auch zum Zeitpunkt des Messbeginns, eine erhöhte Körperkerntemperatur auf.

<sup>8</sup> Die Tötung der Schweine erfolgte hierbei für die toxikologischen Kollegen, um diesen in Kooperation mit der Rechtsmedizin die Entnahme histologischer Proben aus der Leber für toxikologische Untersuchungen zu ermöglichen. Aufgrund der Kooperation von Rechtsmedizin und Toxikologie war es daher möglich an den Schweinen die beschriebenen Abkühlversuche durchzuführen, während an diesen für ein gewisses Zeitintervall keine weiteren toxikologischen Probenentnahmen durchgeführt wurden.



Abbildung 2.4: Versuchsaufbau der Abkühllexperimente am biologischen Modell „Schwein“. Rechte Abbildung: Bedeckung eines Schweins mit dem CF „Bettdecke“.

| Name            | T(r@D) (°C) | T(a) (°C) | cw (kg) | rw (kg) | Länge (h) |
|-----------------|-------------|-----------|---------|---------|-----------|
| S1              | 36,8        | 22,6      | 55,0    | 42,5    | 22,65     |
| S2              | 38,9        | 60,0      | 45,0    | 22,5    | 21,18     |
| S3              | 37,0        | 22,1      | 70,0    | 40,2    | 22,63     |
| S4              | 39,1        | 70,0      | 22,0    | 41,5    | 13,83     |
| S5              | 37,4        | 22,6      | 40,0    | 42,2    | 13,92     |
| S6              | Messfehler  | -         | -       | -       | -         |
| S7              | 38,3        | 22,6      | 45,0    | 42,8    | 20,88     |
| S8              | 38,4        | 22,6      | 75,0    | 41,2    | 27,37     |
| S9              | 37,9        | 22,6      | 50,0    | 43,2    | 20,03     |
| S10             | 39,4        | 22,6      | 45,0    | 44,2    | 18,68     |
| S11             | 38,6        | 19,6      | 60,0    | 44,8    | 26,5      |
| S12             | 38,8        | 19,6      | 60,0    | 43,2    | 23,88     |
| S13             | 39,5        | 20,0      | 80,0    | 46,0    | 15,47     |
| S14             | 37,8        | 19,6      | 60,0    | 45,0    | 27,95     |
| S15             | 38,4        | 19,6      | 55,0    | 47,2    | 18,77     |
| S16             | 38,4        | 19,6      | 70,0    | 46,2    | 25,7      |
| S17             | 38,2        | 21,0      | 40,0    | 45,0    | 17,78     |
| S18 (Bettdecke) | 37,3        | 21,0      | 110,0   | 45,0    | 25,72     |

Tabelle 2.3: Tabellarische Übersicht der in den Kühllexperimenten verwendeten Schweine

## 2.6    AUFBEREITUNG DES ROHDATENSATZES

Zur weiteren Verarbeitung der aufgezeichneten Daten war ein Aufbereiten der Rohdaten im csv - Format notwendig. Hierfür wurden verschiedene Tools in Art von jeweils selbst konzipierten Software-Skripten (PYTHON bzw. bash-Skripte) und Terminal basierten Programmen verwendet. Die Kühlzeiträume wurden so beschnitten, dass sie im Sinne der Methode nach HENSSGE (Abkühlung bis auf minimal  $Q = 0,2$ ) verwendbar waren. Hierbei erfolgte die Temperaturoaufzeichnung durch die Thermometersonden als fünfstellige Zahl, die im Anschluss daran zur Dezimalzahl umgewandelt wurde.

Die zwar hoch aufgelösten, jedoch bei genauer Betrachtung in Stufen verlaufenden Kühlkurven wurden vor ihrer weiteren Verwendung durch ein PYTHON-Skript mittels des Sawitzky-Golay (SG)-Filters geglättet [41]. Anschließend erfolgte eine graphische Aufzeichnung der Kühlkurven, in denen die Rektal- und Umgebungstemperatur auf der y-Achse in Abhängigkeit von der Zeit auf der x-Achse dargestellt wurden.

## 2.7    BRUTEFORCING-SKRIPT ZUR BERECHNUNG DER ENDERGEBNISSE

Zuerst wurden wichtige Informationen über die einzelnen Kühlversuche (z. B. Name des verwendeten Dummies, verwendete Kühlbedingungen,  $T_{(a)}$ ,  $T_{(r@D)}$ , Messzeit usw.) innerhalb eines Masterfiles im csv-Format abgelegt. Dieses konnte in den späteren BF-Berechnungen eine gezielte Suche nach Experimenten bzw. deren Gruppierung nach ähnlichen Kühlbedingungen (z. B. nur CF über einem Wert von 1 bei Kühldummy „1a“) ermöglichen.

Für die nachfolgende BF-Berechnung der so generierten Fälle im Masterfile kam hierbei dann ebenfalls ein selbst geschriebenes PYTHON-

Skript zum Einsatz. Dieses erzeugte die entsprechenden Ergebnisdateien, die in einzelnen csv-Dateien abgespeichert wurden. Auf Grundlage dieser Dateien konnte später dann eine Erzeugung verschiedener Grafiken zur Auswertung der einzelnen bzw. gruppierten Kühlexperimente erfolgen.

Hierfür wurde die Formel nach HENSSGE 1.2 innerhalb des dem BF-Algorithmus zugrunde liegenden PYTHON-Skripts in ein Berechnungsprogramm (genannt Funktion) eingepflegt. Über diese Funktion führten wir eine Serienberechnung durch, in dem wir über variable Anteile dieser *iterierten*.

Hierbei erfolgte den Grundannahmen<sup>9</sup> folgend eine kleinschrittige (0,1 kg - Schritte) Iteration im Bereich zwischen minimal 20,0 kg und maximal 250,0 kg des Kühlgewichts. Weiterhin erfolgte eine Auswahl verschiedener Zeitintervalle (15-, 30-, 60 Minuten), über die ebenfalls eine Iteration erfolgte.

Unter Berücksichtigung der entsprechenden zeitlichen Abstände wurde dann das Kühlgewicht ausgewählt, für welches die geringste Abweichung der Erwartungswerte (Differenz, die dem Betrag 0 am nächsten kommt) erzielt wurde. Nachdem das passende Kühlgewicht festgestellt und abgespeichert wurde, wurde mit dem nächsten Temperaturpaar die Berechnung fortgesetzt. Die Gesamtheit der so ermittelten Kühlgewichte wurden in Abhängigkeit von der Zeit in einer Kühlgewichtskurve (CWC) graphisch aufgetragen.

Für jedes Experiment wurden diese Berechnungen dann unter Annahme verschiedener  $T_{(a)}$  wiederholt. Dabei kamen insgesamt fünf verschiedene  $T_{(a)}$  zum Einsatz ( $\pm 1$  °C;  $\pm 2$  °C;  $\pm 0$  °C).<sup>10</sup>

Wie vorbeschrieben wurden auch  $T_{(r@D)}$  von mehr als 37,2 °C hergestellt. In der Auswertung wurde hierfür zuerst ein sogenannter „ignoranter“-Berechnungsansatz gewählt. Hiermit soll ausgedrückt werden, dass auch nach Analyse der CWC und dem folgenden Feststellen einer erhöhten  $T_{(r@D)}$ , die von HENSSGE postulierte Starttemperatur von 37,2 °C angenommen wurde. Erst innerhalb der am Schwein durchgeführten Kühlversuche wurde ein sogenannter „educated“ Berechnungsansatz gewählt, um damit der aus der Analyse der CWC bekannten, erhöhten Starttemperatur Rechnung zu tragen (siehe Ergebnisteil). Für die ermittelten Datensätze aus dem ermittelten Kühlgewicht, der angenommenen  $T_{(a)}$  und der momentanen  $T_{(r)}$  wurde dann die relative Todeszeit berechnet. Diese konnten mit der bekannten Kühlzeit (Todeszeit des Dummies) abgeglichen werden und einer statistischen Fehlerauswertung zugeführt werden.

### 2.7.1 Statistische Fehleranalyse

Anhand der berechneten Diskrepanzen aus geschätzter und berechneter Todeszeit (Kühlzeit) konnten Fehlerberechnungen durchgeführt

- 
- <sup>9</sup> Für welches Kühlgewicht wird eine konstante *absolute Todeszeit* berechnet? Beziehungsweise: Für welches Kühlgewicht spiegeln die berechneten Erwartungswerte die zeitliche Distanz zwischen den abgeleiteten Temperaturen wider?
- <sup>10</sup> Insgesamt ergeben sich für jeden Kühlversuch damit 15 Berechnungen (fünf verschiedene  $T_{(a)}$  mit jeweils drei verschiedenen Zeitintervallen (0,25 h, 0,5 h, 1 h) zwischen den Messungen) mittels des BF-Ansatzes.

werden. Diese wurden analog zur Fehlerabschätzung in den Arbeiten nach HENSSGE durchgeführt. Das heißt, dass die Fehlerstreuung in Relation zur relativen Abkühlung „Q“ gesetzt wurde.<sup>11</sup> Die ermittelten Fehler wurden daraufhin hinsichtlich Standardabweichung bzw. des Standardfehlers ausgewertet. Später folgte hierbei eine graphische Darstellung der berechneten Fehler in Form von Histogrammen (siehe Ergebnisteil).

---

<sup>11</sup> Q = 1,0 bis 0,5 entspricht  $\pm 2,8$  h ohne bzw. mit CF ; Q = 0,5 bis 0,3 entspricht  $\pm 3,2$  h ohne CF bzw.  $\pm 4,5$  h mit CF ; Q = 0,3 bis 0,2 entspricht  $\pm 4,5$  h ohne CF bzw.  $\pm 7,0$  h mit CF.

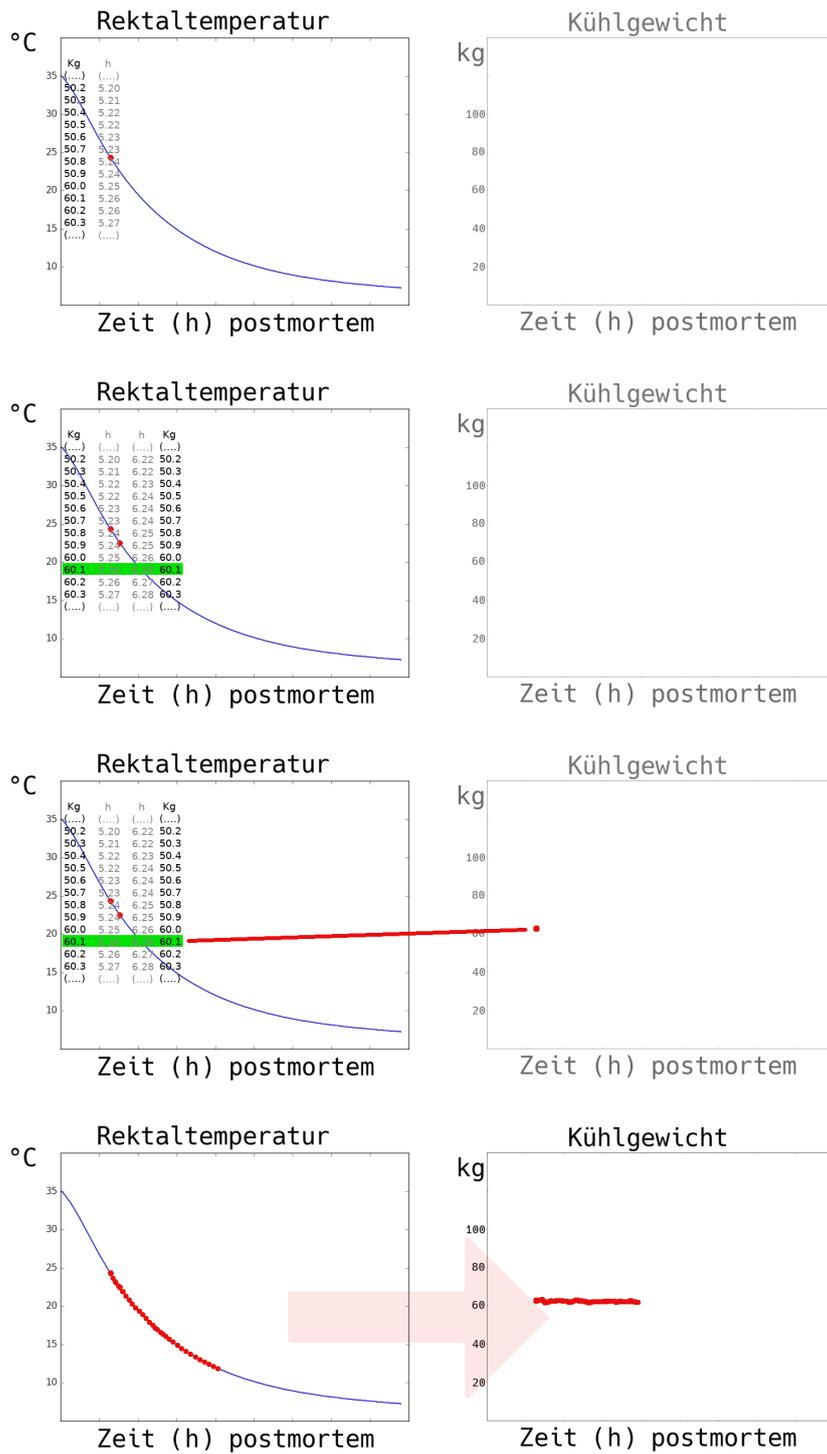


Abbildung 2.5: Von oben nach unten: Berechnung cw und Erwartungswert. Berechnung cw und Erwartungswert 1 Stunde später. Grün markiertes Wertepaar: Übereinstimmung gemessenes Zeitintervall / Intervall zwischen Erwartungswerten - korrektes cw. Graphische Auftragung als CWC - korrekte Parameter: Horizontale Gerade.

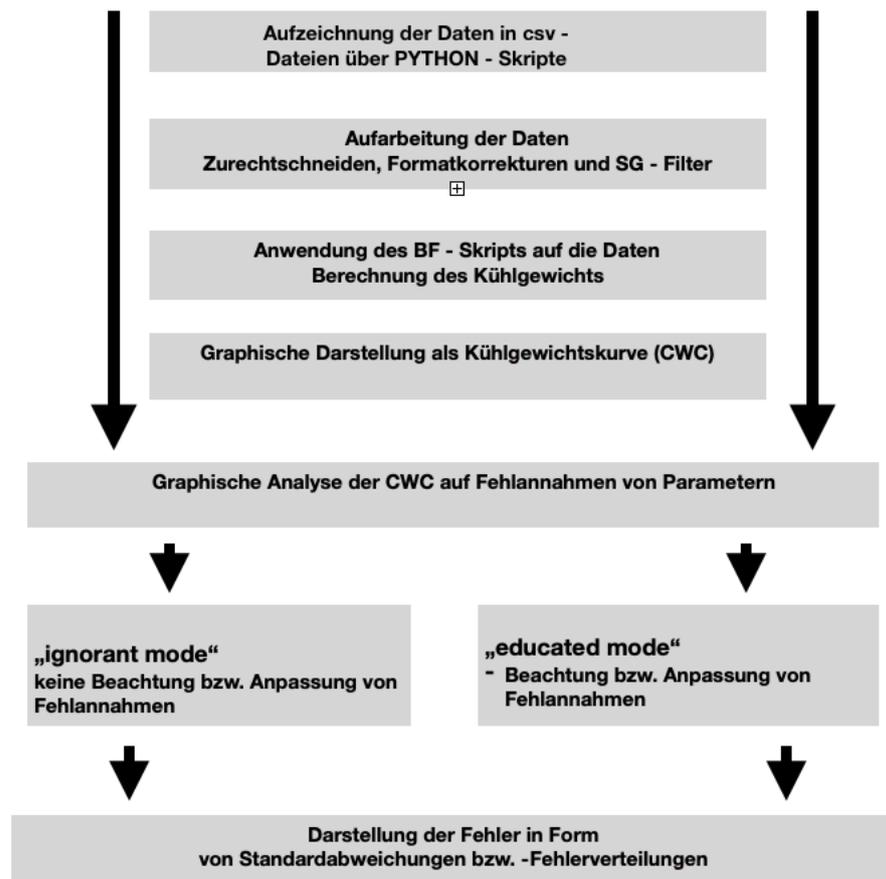


Abbildung 2.6: Flußdiagramm über die einzelnen Schritte zur Gewinnung und Bearbeitung der Daten.

Teil III

ERGEBNISSE



Wie im Methodikteil beschrieben, wurden durch das Umstellen der Formel nach HENSSGE hochaufgelöste, ideale Kühldaten generiert. Eine Anwendung der BF-Methode auf die generierten Kühldaten war hierbei möglich. Hierbei erfolgte die Anwendung mittels eines selbst konzipierten PYTHON-Skripts, welches die gebrutforcten Kühlgewichte berechnete. Diese wurden daraufhin in Form einer Kühlgewichtskurve (CWC) aufgetragen. Diese so festgestellte CWC wurde dann zur Auswertung hinsichtlich ihrer Form bei korrekter und später auch bewusst falscher Annahme aller in die Formel nach HENSSGE eingehenden Parameter beurteilt. Dies erfolgte, um bei primär unbekanntem Parameter eine für reale Gegebenheiten erwartbare Fehleinschätzung zu simulieren und deren Konsequenzen auf die Fehler bzw. deren -verteilung kontrolliert durch Verwendung der idealen Daten zu erfassen.

Bei korrekter Annahme aller in die Formel nach HENSSGE eingehender Parameter (Faktor  $A$ ,  $T_{(a)}$ ,  $T_{(r@D)}$ ), ergab sich eine konstante, lineare Ableitung der CWC, welche das korrekte Kühlgewicht enthält (siehe schwarze, horizontal verlaufende CWC in 3.1). Hierbei entsprach der Wert für das in der CWC dargestellte Kühlgewicht dem Wert des modellierten idealen Kühlgewichts.

Da es in der praktischen Fallarbeit zu subjektiven Fehlannahmen bestimmter Parameter kommen kann, z.B. aufgrund von Abweichungen bei der Schätzung des virtuellen Gewichts, der Korrekturfaktoren oder uneindeutiger Informationen bezüglich  $T_{(a)}$  und  $T_{(r@D)}$ , wurden verschiedene Fehlannahmen dieser Faktoren in die Berechnung eingepflegt.

Zunächst wurde hierzu eine  $T_{(a)}$  bewusst falsch angenommen, wie es in der Praxisarbeit immer wieder vorkommt. Wurde die  $T_{(a)}$  hierbei fälschlicherweise als zu hoch angenommen, zeigte sich ein stetig ansteigender, linearer Verlauf der CWC über den Zeitverlauf (siehe blaue CWC in 3.1). Gegensinnig verhielt sich die CWC bei falsch niedrig angenommener  $T_{(a)}$ . Hierbei zeigte sich ein stetig abfallender, linearer Verlauf der CWC über den gesamten Zeitverlauf (siehe rote CWC in 3.1). Dies lässt sich intuitiv darüber erklären, dass ein Körper bei einer Fehlannahme der  $T_{(a)}$  mit zu hohem Wert „zu langsam“ abkühlt, um die abgeleiteten, als korrekt anzunehmenden  $T_{(r)}$  rechtzeitig zu erreichen. Da in der BF-Methode das Kühlgewicht der

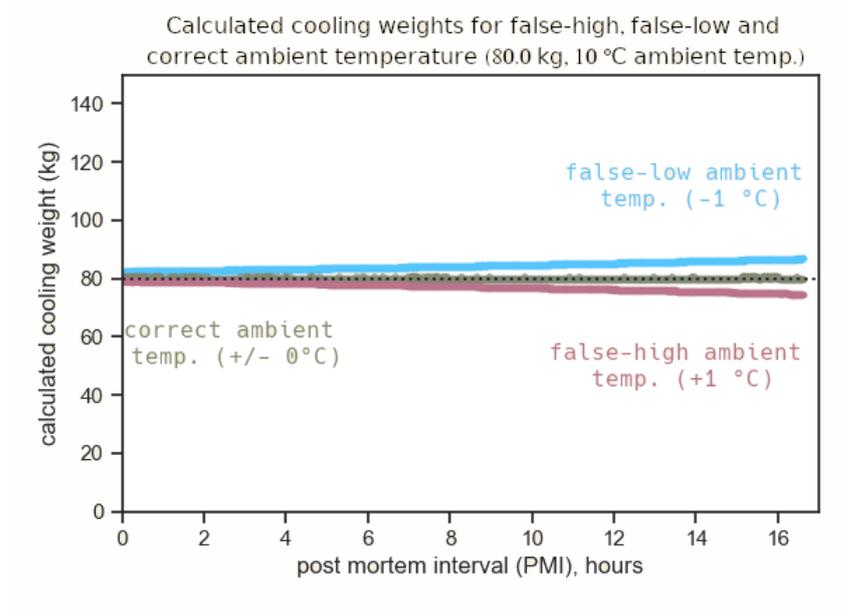


Abbildung 3.1: CWC für modellierte, ideale Kühldaten bei verschiedenen Umgebungstemperaturen.

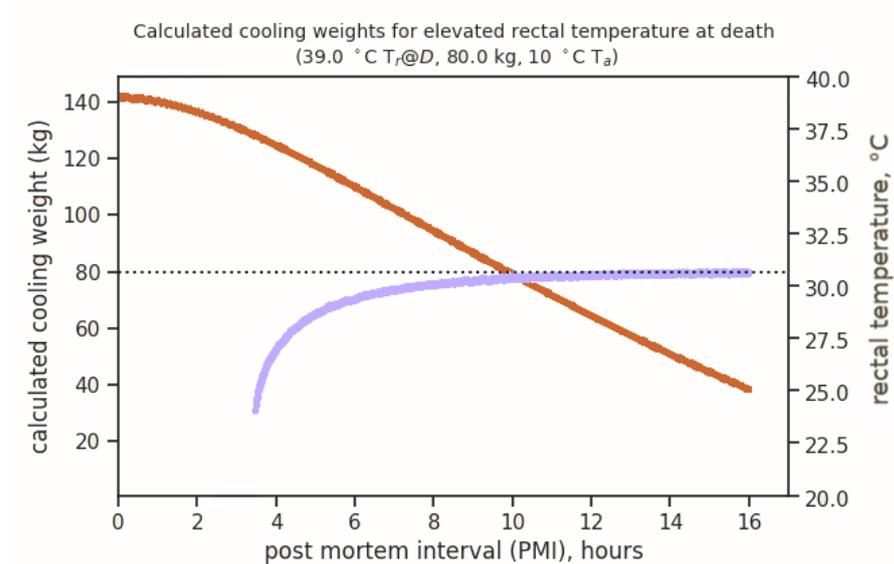


Abbildung 3.2: CWC für modellierte, ideale Kühldaten bei erhöhter Rektaltemperatur zum Tod. Orangefarbene Kurve = Umgebungstemperatur. Violette Kurve = CWC.

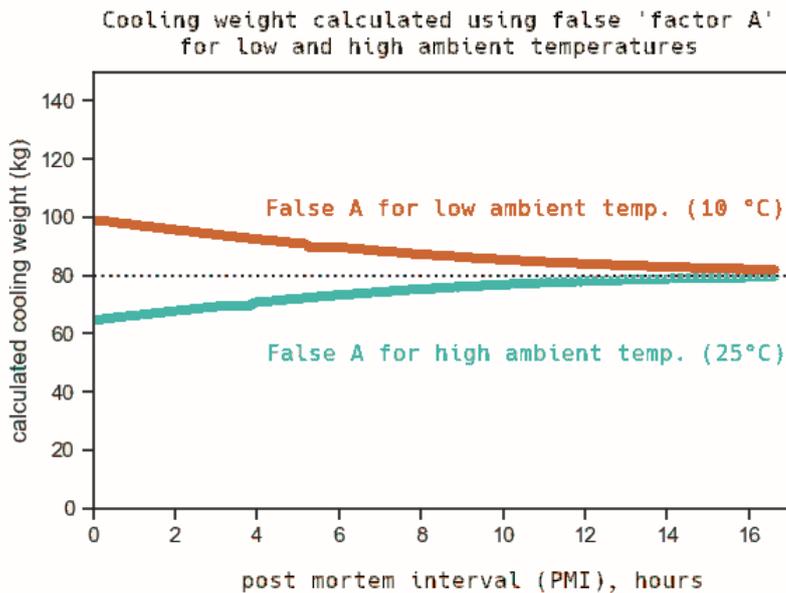


Abbildung 3.3: CWC für modellierte, ideale Kühldaten bei Annahme des falschen Wertes für Faktor A abhängig von der Umgebungstemperatur.

einzig variable Parameter ist, erfolgt die Kompensation hierbei über ein Abnehmen des Kühlgewichts über die Zeit (= „der Körper muss mit voranschreitender Zeit immer leichter werden“). Genau umgekehrt verhält es sich bei einer Fehlannahme der  $T_{(a)}$  mit zu niedrigem Wert, wobei der Körper zu schnell abkühlt (um die abgeleiteten  $T_{(r)}$  rechtzeitig zu erreichen), was mit voranschreitender Zeit über ein zunehmendes Kühlgewicht kompensiert wird (= „der Körper muss mit voranschreitender Zeit immer schwerer werden“) (siehe Diskussion).

Als ebenfalls unbekannt kann in der Praxis die tatsächliche vorliegende  $T_{(r@D)}$  betrachtet werden. Auch hier kann es im Rahmen der realen Fallarbeit dazu kommen, dass das Vorliegen einer antemortem erhöhten  $T_{(r@D)}$  bei einer Leiche berücksichtigt werden muss. Folglich wurde daher untersucht, wie sich eine erhöhte  $T_{(r@D)}$  bei Fehlannahme einer regulären  $T_{(r@D)}$  (= 37,2 °C) im Rahmen der Todeszeitschätzung auf das durch die BF-Methode berechnete Kühlgewicht auswirkt. Die Simulation einer erhöhten  $T_{(r@D)}$  erfolgte hierbei, indem ideale Kühldaten unter der entsprechenden Annahme eines erhöhten Wertes generiert wurden. Auf diese wurde dann die BF-Methode unter Annahme eines Normwertes für die  $T_{(r@D)}$  (= 37,2 °C) angewendet.

Hierbei zeigte sich eine charakteristische Form der CWC, bei der sich zu Beginn ein extrem niedriges Kühlgewicht berechnet, welches dann steil ansteigt und sich dem realen, als korrekt anzunehmenden Kühlgewicht nähert (siehe Abbildung 3.2). Dies ist darüber zu erklä-

ren, dass die für den im Sinne der NM - Methode „frühen Zeitraum“ (d. h. unmittelbar auf die  $T_{(r@D)}$  37,2 °C folgende) tatsächliche Kühlkurve (z. B. von 39,0 °C kommend), sehr rapide abfällt. Ein solche rasche Abkühlung wäre für die Annahme einer regulären  $T_{(r@D)}$  (analog zu den Angaben oben) über das Kühlgewicht als einzig variablem Parameter nur dadurch zu erklären, dass der Körper in der Anfangsphase so schnell abkühlt, als wäre er sehr leicht. Bemerkenswert ist, dass dieser Effekt auch zu einem fortgeschrittenen Zeitpunkt innerhalb der Abkühlung (zu dem die  $T_{(r@D)}$  sich schon normalisiert hat) einen Hinweis auf die zu Beginn vorliegende Erhöhung gibt. Da eine solche Erhöhung möglicherweise noch über mehrere Stunden nachweisbar ist, eröffnet dies die Möglichkeit (gegebenenfalls durch Anpassung der Formel), die negativen Effekte einer erhöhten  $T_{(r@D)}$  auf die Genauigkeit der Todeszeitschätzung zu kompensieren.

Weiterhin wurden die Auswirkungen eines falsch gewählten Wertes für Faktor A, in Abhängigkeit von der vorliegenden  $T_{(a)}$ , untersucht (siehe Abb. 3.3). Hierbei wurden kreuzweise die falschen Werte anhand der vorliegenden  $T_{(a)}$  ausgewählt. Dieser sollte hierbei, als Analysemittel dienen, da er für  $T_{(a)}$  über bzw. unter 23,2 °C einen konstanten Wert annimmt. Auch hier wurde der falsche Wert für Faktor A (z. B. Vorliegen einer festgesetzten  $T_{(a)}$  von 10,0 °C, Auswahl von Faktor A für über 23,2 °C) innerhalb des BF-Verfahrens ausgewählt, um den Effekt auf die CWC zu untersuchen. Es zeigten sich jeweils asymptotische Annäherungen der CWC an das korrekte Kühlgewicht. Entsprechend zu den Ergebnissen bei der als zu hoch angenommenen  $T_{(a)}$  oder erhöhten  $T_{(r@D)}$  ergaben sich bei Annahme des Faktors A für über 23,2 °C (obwohl  $T_{(a)} = 10,0$  °C) zuerst sehr niedrige Kühlgewichte. Gegensätzlich verhielt es sich bei Annahme des Faktors A mit dem Wert für unter 23,2 °C (obwohl  $T_{(a)} = 25,0$  °C), wo zuerst sehr hohe Kühlgewichte berechnet wurden (genauere Interpretation siehe Diskussion bzw. folgender Abschnitt über Zusammenspiel Faktor A und Kühlgewicht im Ergebnisteil).

In der Praxisarbeit kann eine Fehlannahme des Faktors A hingegen praktisch nicht erfolgen, da für die unterschiedlichen  $T_{(a)}$ -Werte zwei Vorlagen des NM existieren.

### 3.1 KÜHLDATEN AUS DEN KÜHLDUMMY-EXPERIMENTEN

#### 3.1.1 *Analyse der CWC-Formen bei korrekter und bewusster Fehlannahme verschiedener Parameter*

Zunächst wurden die zuvor festgestellten, charakteristischen CWC-Formen (bei korrekter Annahme bzw. Fehlannahme ausgewählter Parameter) im nächsten Schritt auch in Kühlexperimenten am Dummy-

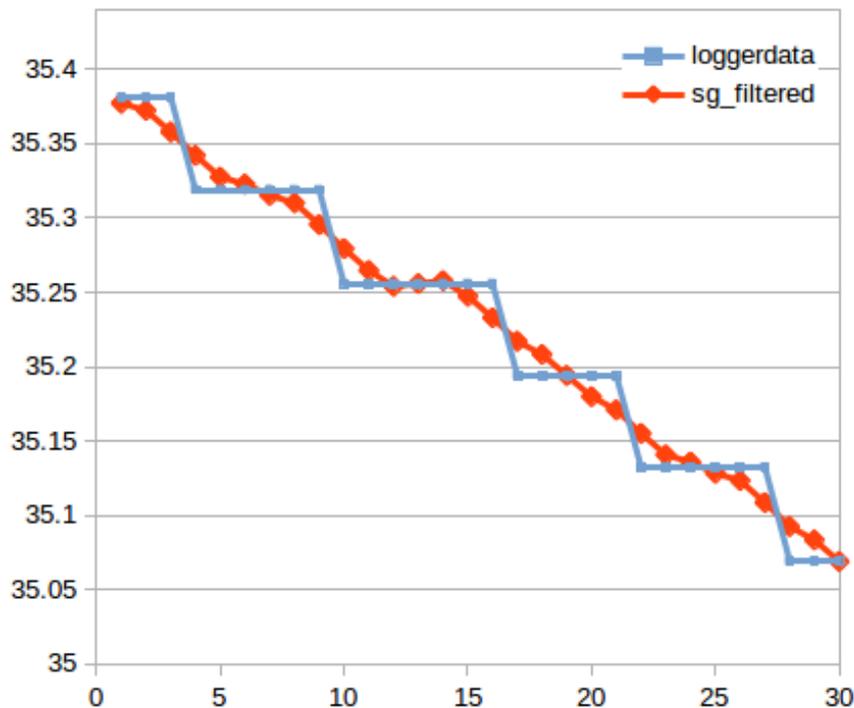


Abbildung 3.4: Darstellung der exemplarischen Loggerdaten vor Glättung durch den SG-Filter (blaue, stufig absteigende Kurve). Nach der Glättung durch den SG - Filter (rote Kurve) zeigte sich eine normale Kühlkurve.

und Schweinemodell nachvollzogen. Im Vergleich mit dem Procedere bei den modellierten idealen Kühlzeiten musste hierbei jedoch noch ein Zwischenschritt zwischen der Ableitung der Kühlzeiten und deren Prozessierung durch die BF-Berechnung mit nachfolgender graphischer Darstellung als CWC implementiert werden

Zuerst musste hierbei nämlich eine Glättung der Kühlzeiten aus den Dummyversuchen erfolgen, da die Kühlzeiten aus dem Dummy- bzw. Schweinekühlversuch nicht in ähnlich hoher Auflösung abgeleitet werden konnten, wie bei den modellierten idealen Kühlzeiten. Aufgrund der niedrigen Auflösung kam es zu messtechnisch bedingten Stufen innerhalb der Kühlkurven, deren Entfernung notwendig war (siehe Abbildung: 3.4). Um die Glättung der Daten automatisiert umzusetzen, wurde der SG-Filter über ein weiteres PYTHON-Skript realisiert. Nach der Glättung der Kühlzeiten aus den Dummyversuchen war die BF-Berechnung mittels des PYTHON-Skripts mit nachfolgender Ableitung der zu betrachtenden CWC dahingehend ohne große Einschränkungen möglich.

Hierbei wurde das BF-Skript im Verlauf der Experimente mehrmals modifiziert, wodurch es zu einer Verkürzung der anfänglich

deutlich längeren Berechnungsdauer kam. Hierbei war eine maximale zeitliche Optimierung der Berechnungen jedoch nicht das Ziel, sodass wir bei umfangreichen Berechnungen auf die simultane Verwendung mehrerer Computer auswichen.

Die an den idealen Kühldaten festgestellte charakteristische Form der CWC (siehe 3.1) konnte auch in den Dummyversuchen bestätigt werden (siehe Abbildung 3.5). Bei korrekter Annahme aller Parameter ergab sich hierbei der zu erwartende charakteristische horizontale Kurvenverlauf. Hierbei ist der horizontale Kurvenverlauf mit einem stetigen Zielwert (konstantes Kühlgewicht), wie auch in der Theorie ausführlich besprochen, als Kriterium für eine korrekte Annahme aller in die Formel nach HENSSGE einfließenden Parameter zu sehen. Kommt es daher zu Abweichungen von dem horizontalen Kurvenverlauf, ist, wie in der Theorie angesprochen, von einer Fehlannahme gewisser Parameter auszugehen. Gewisse charakteristische Kurvenformveränderungen (siehe folgende Absätze) lassen hierbei im Abschluss an die BF-Berechnung nicht nur einen Rückschluss auf Fehlannahmen zu, sondern ermöglichen auch eine spätere Korrektur.

Auch in den Dummyversuchen wurden die theoretisch festgestellten charakteristischen Formveränderungen der CWC bei Annahme unterschiedlicher  $T_{(a)}$  untersucht. Hierbei konnten die charakteristischen Formveränderungen der CWC bei Fehlannahme einer  $T_{(a)}$  mit zu hohem bzw. zu niedrigem Wert bestätigt werden (vergleiche Abbildung CWC bei idealen Kühldaten 3.1 mit CWC bei Kühldaten aus den Kühlversuchen am Dummy 3.5). Analog zu der charakteristischen Kurvenform bei Annahme der  $T_{(a)}$  mit einem erhöhten Wert (+ 1 °C zum realen Messwert) zeigte sich eine negative Steigung der CWC mit Abnahme („Leiche wird immer leichter“) der Kühlgewichte über die Zeit. Auch die charakteristische Kurvenform der CWC bei Annahme der  $T_{(a)}$  mit einem zu niedrigen Wert (- 1 °C zum realen Messwert) entsprach hierbei den theoretischen Annahmen, die anhand der idealen Kühldaten festgestellt wurden. Es zeigte sich eine positive Steigung der CWC mit über die Zeit zunehmenden Werten für die gebrutforcten Kühlgewichte („Die Leiche wird mit der Zeit immer schwerer“).

Weiterhin konnte auch die charakteristische Kurvenform der CWC bei Annahme einer normalen  $T_{(r@D)}$ , obwohl diese auf über 37,2 °C erhöht war, bestätigt werden. Hierbei zeigte sich, wie auch schon bei den idealen Kühldaten, ein initialer Anstieg der CWC (vergleiche hierfür Abbildung 3.2 bei den idealen Kühldaten mit 3.6 bei den Kühldaten aus den Versuchen am Dummy). Hierbei stellte sich der initiale Anstieg so steil dar, da zuerst sehr niedrige Kühlgewichte durch das BF berechnet wurden. Auch nach einigen Stunden, dementsprechend auch über die Erhöhung der  $T_{(r@D)}$  über 37,2 °C hinaus, enthielt die

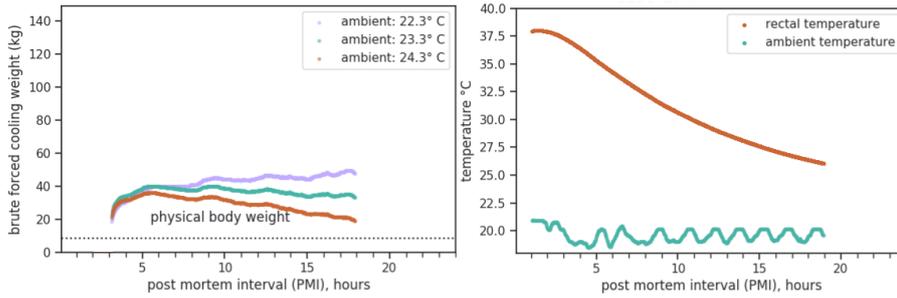


Abbildung 3.5: CWC bei Variation der  $T_{(a)}$  (links) und die dazugehörige Kühlkurve (rechts).

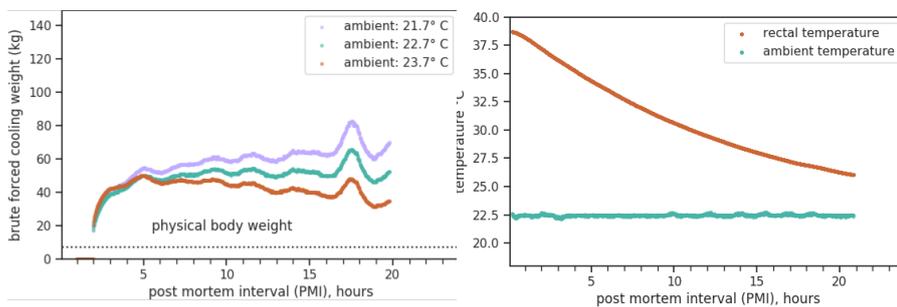


Abbildung 3.6: CWC mit Initialanstieg bei erhöhter  $T_{(r@D)}$  (links) und dazugehörige Kühlkurve (rechts).

CWC sehr niedrige Kühlgewichte (siehe Abbildung: 3.6). Erst über den Verlauf der Zeit kam es hierbei zu einer Normalisierung der Kühlgewichte auf konstantem, als korrekt anzunehmendem Niveau als horizontale Gerade.

Eine Variation des Faktors A durch Annahme mit dem falschen Wert (abhängig von dem vorliegenden Wert für  $T_{(a)}$ ) wurde in den Kühlexperimenten am Dummy nicht explizit untersucht. Jedoch zeigten sich bei Vorliegen einer  $T_{(a)}$  im negativen Bereich innerhalb der Kühldummy-Experimente gewisse Effekte (hohes Kühlgewicht bei Kühldummies mit sehr leichtem und mittelschwerem Realgewicht), welche später innerhalb des Ergebnisteils bzw. der Diskussion gesondert besprochen werden.

Insgesamt konnten die theoretisch festgestellten charakteristischen CWC-Formen daher sowohl bei korrekter Annahme, als auch bei Fehlannahme gewisser Parameter bestätigt werden.

### 3.1.2 Einzel- und Gesamtbetrachtung der durch die BF-Berechnung abgeleiteten Kühlgewichte

Innerhalb der weiteren Auswertung erfolgte eine isolierte Betrachtung der durch die Bruteforcing-Berechnung berechneten Kühlgewichte unter verschiedenen Umwelteinflüssen

(verschiedene Werte für  $T_{(r@D)}$  und Variation zwischen Verwendung von CF und Standardbedingungen nach HENSSGE).

Zur systematischen Untersuchung wurden die Experimente daher zunächst nach verschiedenen Kriterien sortiert und daraufhin in verschiedene Gruppen eingeteilt. Beispielsweise erfolgte diese Einteilung anhand des vorliegenden Realgewichts der betrachteten Dummies in drei Gruppen („leicht, mittelschwer und schwer“) (siehe Tabelle 3.2), weiterhin auch nach der  $T_{(r@D)}$ , den verwendeten CF oder nach der vorliegenden  $T_{(a)}$  (siehe Tabellen: 3.17 und 3.16). Einen Überblick über die Gesamtzahl der durchgeführten Experimente und die prozentuale Aufteilung auf die verschiedenen Kühlszenarien ist in der Tabelle 3.1 dargestellt.

Für die gebrutforcten Kühlgewichte ergaben sich hierbei für die leichten (3.7) und mittelschweren Kühldummies (3.8) niedrigere Kühlgewichte als für die schweren Kühldummies „3a“ und „3b“ (3.2), entsprechend zu deren niedrigeren bzw. höheren Realgewichten (siehe Tabelle 3.1. Daraus abzuleiten ist daher, dass eine Korrelation der physikalisch messbaren Größe des Realgewichts und des durch die BF-Berechnung bestimmten Kühlgewichts vorliegt (d.h. „hohes Realgewicht = hohes Kühlgewicht und umgekehrt niedriges Realgewicht = niedrigeres Kühlgewicht“. Auch das Verhältnis der Realgewichte unserer Kühldummies zu den zugehörigen gebrutforcten Kühlgewichten zeigte sich hierbei vergleichbar mit den von HENSSGE in [22] veröffentlichten Werten für das Verhältnis der von ihm berechneten virtuellen Kühlgewichte zu den tatsächlich vorliegenden Realgewichte seiner Dummies.

Erneut zu erwähnen ist hierbei, dass das Realgewicht und Kühlgewicht trotz dieser Korrelation nicht direkt miteinander zu vergleichen sind, da das Kühlgewicht verschiedene weitere Kühlbedingungen einschließt und das Realgewicht ein physikalisch messbarer Wert ist. Ebenfalls wichtig ist hierbei, dass das Kühlgewicht rein die Abkühlung des Torsos darstellt, während an einer Leiche auch noch Extremitäten und der Kopf vorhanden sind, die an der Abkühlung teilnehmen. Analog hierzu lässt sich auch das Verhältnis der virtuellen Kühlgewichte, die in den Experimenten von HENSSGE festgestellt wurden, zu den Realgewichten seiner Kühldummies über die Annahme der Abkühlung eines Leichnams als reine Abkühlung von dessen Torso erklären. Das Kühlgewicht war daher auch nicht der Zielwert

unserer Berechnungen, sondern über dessen Berechnung war im späteren Verlauf dann die Berechnung des eigentlichen Zielwertes „der Todeszeit“ innerhalb der Intervallgrenzen nach HENSSGE möglich.

Insgesamt wurde dabei unter Standardbedingungen festgestellt, dass das minimale gebrutforcte Kühlgewicht bei den leichten Dummies „4b“ und „1b“ bei  $\approx 30$  kg betrug. Das maximale gebrutforcte Kühlgewicht wurde hierbei bei Kühldummy „3a“ mit  $\approx 90$  bis 110 kg erreicht (siehe Tabelle 3.2). Die schweren Kühldummies (Realgewicht  $> 20$  kg) wiesen bei Abkühlung bei Raumtemperatur nur mäßig hohe Kühlgewichte (3a: 90 kg; 3b: 80 kg) auf.

### 3.1.3 Betrachtung der gebrutforcten Kühlgewichte unter Verwendung verschiedener Werte für $T_{(a)}$

Die folgenden Ausführungen beziehen sich alleinig auf Experimente unter Standardbedingungen ( $CF = 1$ ).

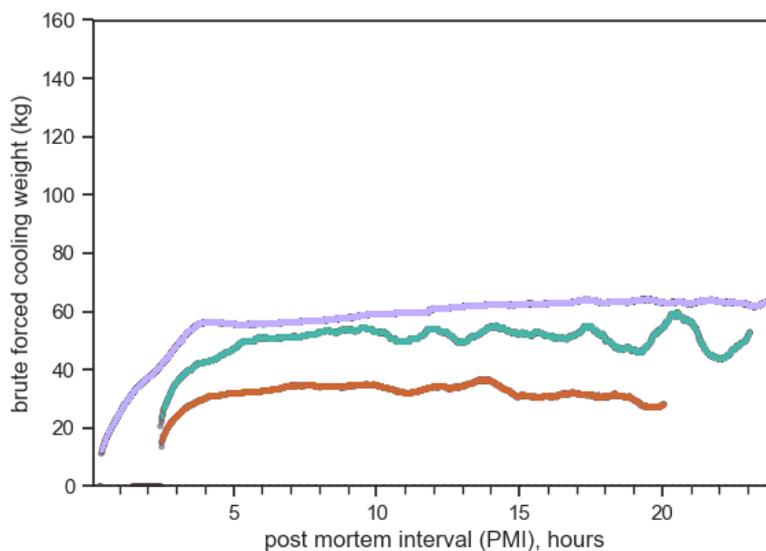


Abbildung 3.7: CWC Kühldummy 4a bei Verwendung verschiedener  $T_{(a)}$  (violette Kurve: negative  $T_{(a)}$ , grüne Kurve: niedrig positive  $T_{(a)}$ , orangene Kurve:  $T_{(a)}$  = Raumtemperatur)

Auffällig war weiterhin, dass kalte Umgebungstemperaturen zu einer Berechnung höherer Kühlgewichte führten, welche durch reine Umweltbedingungen (insbesondere Bedeckung in späteren Experimenten, die unter Verwendung von  $CF$  durchgeführt worden) nicht zu erklären waren. Hierbei konnte sowohl bei den leichten, als auch

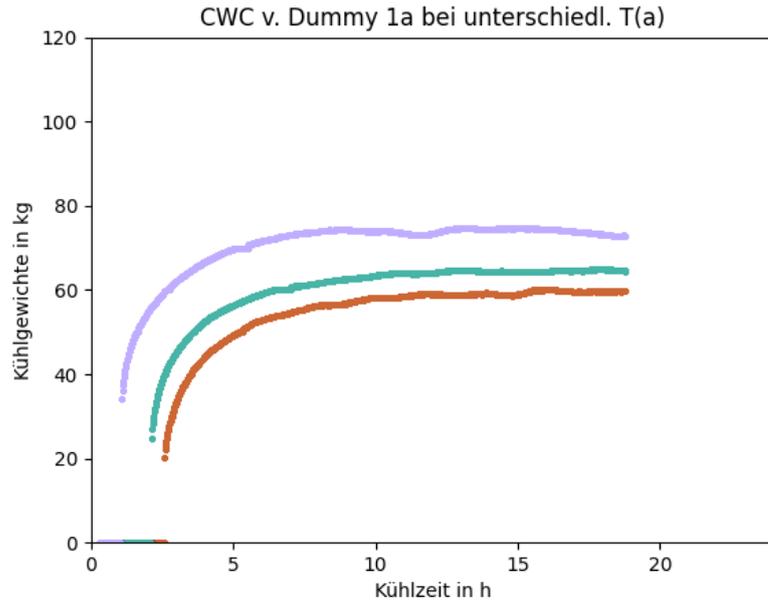


Abbildung 3.8: CWC Kühldummy 1a bei Verwendung verschiedener  $T_{(a)}$  - Farben entsprechend Abb. Kühldummy 1a

bei den mittelschweren Kühldummies festgestellt werden, dass das gebrutforcte Kühlgewicht mit abnehmender  $T_{(a)}$  zunimmt (siehe Abbildungen: 3.7 und 3.8).

Hierbei nahm das berechnete Kühlgewicht für den leichten Kühldummy „4a“ bei Verwendung von Raumtemperatur für die  $T_{(a)}$  einen Wert von 30 kg (orangene Kurve), bei Verwendung von niedrig-positiven Werten für  $T_{(a)}$  einen Wert von 50 kg (grüne Kurve) und bei Verwendung von negativen Werten für  $T_{(a)}$  sogar einen Wert von 55 kg (violette Kurve) an (siehe Abbildung 3.7).

Ähnlich verhielt es sich für den mittelschweren Kühldummy „1a“ bei dem bei Verwendung von Raumtemperatur für die  $T_{(a)}$  das Kühlgewicht 50 kg, bei Verwendung niedrig-positiver Werte für  $T_{(a)}$  einen Wert von 55 bis 60 kg und bei Verwendung von negativen Werten für  $T_{(a)}$  75 kg annahm.

Insgesamt führte die Verwendung niedrig-positiver bzw. negativer Werte für  $T_{(a)}$  dementsprechend zu einer Erhöhung des Kühlgewichts, obwohl die Bedingungen, unter denen alle betrachteten Experimente durchgeführt wurden, Standardbedingungen entsprachen. Zu vermuten ist hier der Zusammenhang mit dem Wert des Faktors A, der zu dieser Erhöhung des Kühlgewichts im niedrig-positiven bzw. negativen Bereich für  $T_{(a)}$  führt (siehe Diskussion). Aufgrund des Versuchsaufbaus mit der Gefriertruhe, die nur einen begrenzten Stau-

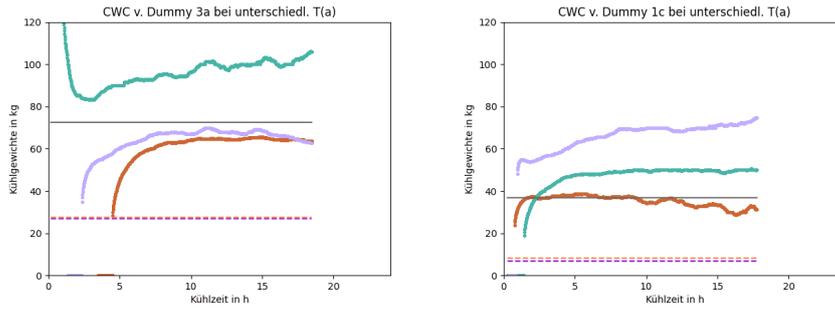


Abbildung 3.9: Realgewichte der Kühldummies von HENSSGE und bei der BF-Methode im Vergleich mit der dazugehörigen CWC-Kurve bei unterschiedlichen  $T_{(a)}$ -Werten. Orangene Kurve Kühlgewichte bei Raumtemperatur. Grüne Kurve Kühlgewichte bei niedrig positiver Umgebungstemperatur. Violette Kurve Kühlgewichte bei negativer Umgebungstemperatur. Graue Kurve Realgewichte. Lilafarbene, gestrichelte Kurve Realgewichte der dargestellten Kühldummies beim Bruteforcing. Hellorangene Kurve Realgewichte vergleichbarer Kühldummies nach HENSSGE.

raum hatte, waren Experimente an den schweren Kühldummies im negativen Bereich für  $T_{(a)}$  nicht in dem Umfang möglich, wie an den kleinen und mittelschweren Kühldummies. Es wurde daher nur eine geringe Anzahl „n“ an Experimenten durchgeführt, in denen die auffällige Beziehung zwischen dem mit abnehmender  $T_{(a)}$  zunehmenden Kühlgewicht nicht bestätigt werden konnte (siehe Abbildung Kühldummy „3a“ in 3.9).

#### 3.1.4 Betrachtung der berechneten Kühlgewichte unter Verwendung verschiedener CF aus der Tabelle von HENSSGE

Es wurden hierfür verschiedene Kühl Szenarien hergestellt. Diese orientierten sich an der Tabelle von HENSSGE. In diesen war der CF  $\neq 1$  (keine Standardbedingungen).

Ziel der Experimente war es zu untersuchen, ob eine Abkehr von dem subjektiven Konzept der Korrekturfaktoren möglich ist. Hierfür erfolgte eine vergleichende Fehlerberechnung unter Verwendung der CF nach HENSSGE und der im Rahmen der Experimenten errechneten Werte für die CF. Hierbei konnte jedoch kein direkter Vergleich der CF nach HENSSGE und der im Rahmen des BF errechneten CF erfolgen. Zuerst musste eine Anpassung der im Rahmen der Experimente bestimmten CF auf ein Kühlgewicht von 70 kg erfolgen, da die CF-Werte in der Tabelle nach HENSSGE für dieses Kühlgewicht angegeben sind.

Ein Überblick über die abgeleiteten Kühlgewichte findet sich in Tabelle 3.3. Für  $T_{(a)}$  unter 0 Grad wurden nur Experimente mit  $CF = 1$  (daher = unter Standardbedingungen) durchgeführt.

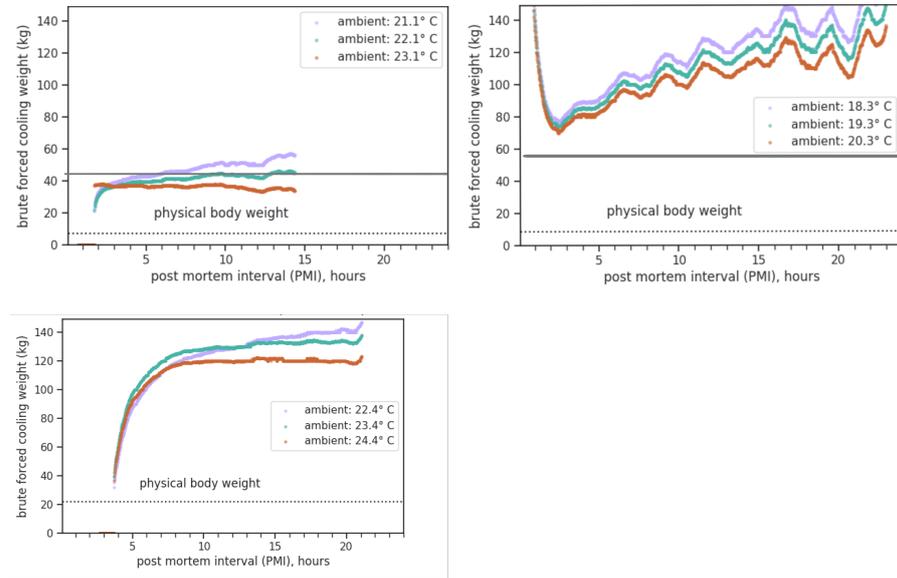


Abbildung 3.10: (Oben links): Kühldummy „1c“ Bedeckung mit einer Lage trockener OP-Kleidung, (oben rechts): Kühldummy „2b“ Bedeckung mit Bettdecke, (unten links): Kühldummy „3b“ bei Bedeckung mit Winterjacke.

In den Abbildungen 3.11 sind hierbei die CWC ausgewählter Experimente unter Einfluss von „die Abkühlung beschleunigenden CF“ dargestellt. Hierbei ergab sich bei beiden CF („Lage feuchte OP-Kleidung“ und „Luftzug durch Ventilator“) eine Erniedrigung des Kühlgewichts auf 40 bzw. 45 kg (Kühlgewicht unter Standardbedingungen: 45 bis 50 kg bzw. 50 kg).

In der Abb. 3.10 sind die CWC für ausgewählte Experimente bei  $CF > 1$  (verlangsamen die Abkühlung) dargestellt. Besonders die CF „Bettdecke“ und „Winterjacke“ führten zu einer Erhöhung des Kühlgewichts auf 110 bzw. 120 kg (Kühlgewicht unter Standardbedingungen: 55 - 60 kg bzw. 80 kg). Der CF „eine Lage trockene OP-Kleidung“ zeigte ebenfalls eine Erhöhung des Kühlgewichts auf 45 kg (Kühlgewicht unter Standardbedingungen: 30 bis 35 kg). Eine tabellarische Darstellung erfolgte in 3.3.

In den Abbildungen 3.12 ist der Einfluss verschiedener CF auf das Kühlgewicht der Kühldummies „4b“ und „2c“ vergleichend dargestellt. Eine tabellarische Übersicht über die berechneten Kühlgewichte findet sich in 3.4. Auch hier führten die Korrekturfaktoren „Winterjacke“, „eine Lage trockene OP-Kleidung“ und „Bettdecke“ zu einer Erhöhung des Kühlgewichts auf 55, 60 und 135 kg (unter Stan-

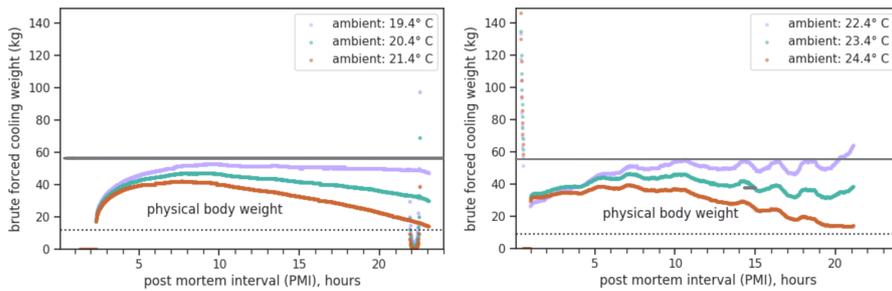


Abbildung 3.11: Links: Kühldummy „1a“ unter kontinuierlicher Luftbewegung durch einen handelsüblichen Ventilator, rechts: Kühldummy „2c“ eine Lage Bedeckung mit feuchter OP-Kleidung

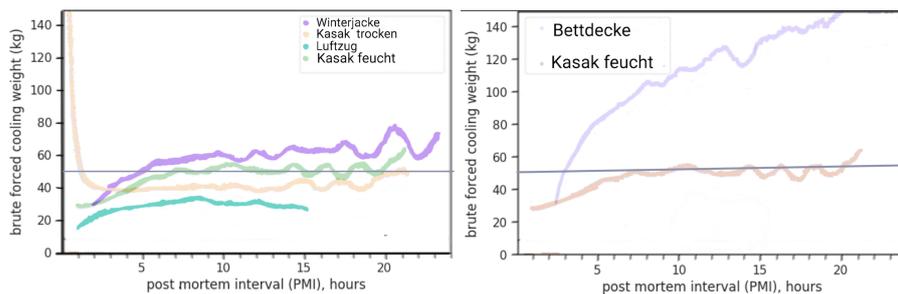


Abbildung 3.12: CWC des Kühldummies „4a“ (linke Abbildung) und „2c“ (rechte Abbildung) unter Einfluss verschiedener CF aus der Tabelle nach HENSSE. Vergleichende Darstellung des Kühlgewichts unter Standardbedingungen: Grau-blaue, horizontal verlaufende CWC.

Standardbedingungen: 45, 50 und 50 kg). Ebenfalls führten die Korrekturfaktoren „Windzug durch Ventilator“ und „eine Lage feuchter OP-Kleidung“ zu einer Erniedrigung des Kühlgewichts auf 40 und 50 kg (unter Standardbedingungen: 50 und 55 kg).

Besonders auffällig zeigte sich bei den „die Abkühlung beschleunigenden Korrekturfaktoren“ das Szenario „Abkühlung unter einer Lage feuchter OP-Kleidung“. Anders als erwartet, führte hier die Anwendung dieses Szenarios oftmals zu keiner Erniedrigung des Kühlgewichts. Erklärend ist der Umstand, dass die OP-Kleidung nur über einen gewissen Zeitraum feucht blieb und dann abtrocknete. Nach Abtrocknen der OP-Kleidung wirkte sich diese daher verlangsamernd auf die Abkühlung des Kühldummies aus. In der Diskussion dieser Arbeit erfolgt eine eingehende Beschäftigung mit diesen problematischen „broken experiments“.

Die in den Abbildungen 3.13 und 3.14 dargestellten Fehler wurden mit den von HENSSE definierten Intervallgrenzen (abhängig von Q (relative Abkühlung)) der NM-Methode verglichen. Für die Fehlerberechnungen wurden die CF70-Werte für die verwendeten Kühlszena-

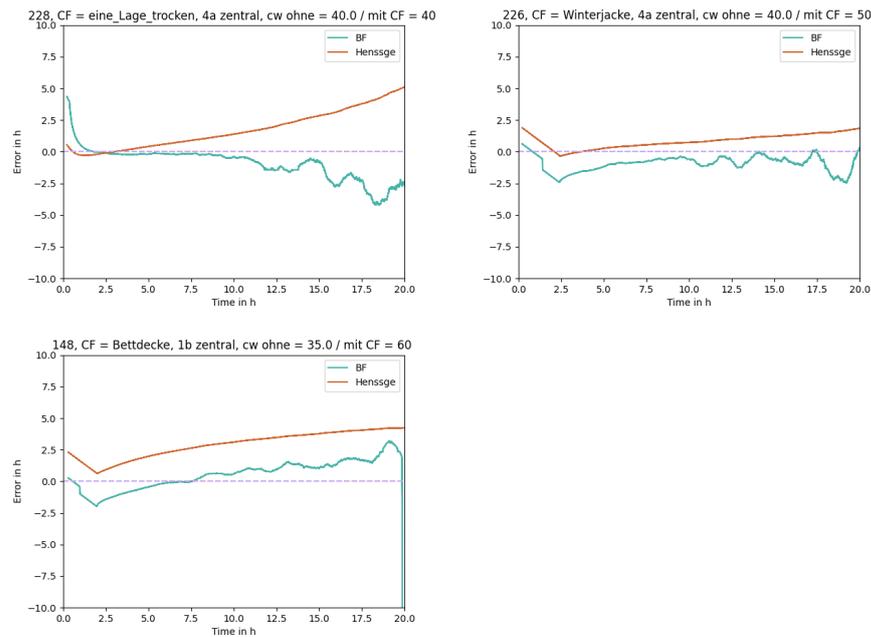


Abbildung 3.13: Vergleichende Darstellung der berechneten Fehler bei Verwendung des CF nach HENSSGE und des für das BF berechneten CF. Abb. oben links entspricht dem CF „Bedeckung mit einer Lage trockener Op-Kleidung“, Abb. oben rechts entspricht dem CF „Bedeckung mit einer handelsüblichen Winterjacke“ und Abb. unten links entspricht dem CF „Bedeckung mit einer Bettdecke“.

rien verwendet, um eine Vergleichbarkeit zu denen von HENSSGE zu ermöglichen. Hierbei ergaben sich der NM gleichwertige bzw. teilweise bessere Ergebnisse für die berechneten Fehler.

Wie zu erwarten, zeigte sich bei den Fehlerberechnungen mit den von HENSSGE beschriebenen Werten für die verwendeten CF ein über die Zeit zunehmender Fehler innerhalb der beschriebenen Intervallgrenzen ( $Q = 1,0$  bis  $0,5$ : (+/-) 2,8 h,  $Q = 0,5$  bis  $0,3$ : (+/-) 4,5 h und  $Q = 0,3$  bis  $0,2$ : (+/-) 7,0 h). Bei der Fehlerberechnung mit den durch das BF bestimmten CF-Werten ergab sich hingegen ein undulierendes Fehlermuster mit maximal 3 h Unterschätzung bei fortgeschrittener Abkühlung ( $Q = 0,3$  bis  $0,2$ ). Besonders bei den „broken experiments“ mit dem CF („feuchte Bedeckung“) waren die berechneten Fehler mittels BF-Methode besser, als die von HENSSGE definierten Intervallgrenzen (siehe Abb. 3.14).

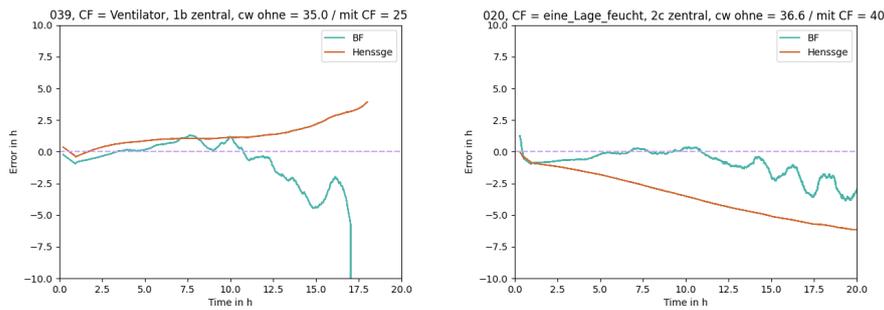


Abbildung 3.14: Vergleichende Darstellung der berechneten Fehler bei Verwendung des CF nach HENSSGE und des für das BF berechneten CF. Abbildung I entspricht dem CF „Luftzug durch Ventilator“ und Abbildung II entspricht dem CF „Bedeckung mit einer Lage feuchter OP-Kleidung“.

### 3.2 FEHLERBERECHNUNG

Es wurde die bekannte Todeszeit<sup>1</sup> mit der durch die BF-Methode errechneten Todeszeit verglichen. Die Differenz beider ergab den Fehler, für welchen das dazugehörige  $Q$  (=relative Abkühlung) bestimmt wurde. Hierdurch war ein Vergleich mit den Intervallgrenzen nach HENSSGE möglich (siehe Abb. 3.15, 3.16 und 3.17). Eine tabellarische Auftragung der berechneten Fehler erfolgte in 3.6. Analog zu den anderen Teilen der Arbeit erfolgte auch die Fehlerberechnung für Szenarien mit einer erhöhten  $T_{(r@D)}$  und verschiedenen Werten für  $T_{(a)}$ .

Im Vergleich mit den von HENSSGE definierten Standardfehlern ergaben sich bei den in 3.15, 3.16, 3.17 betrachteten Kühldummies gleichwertige bzw. teilweise bessere Ergebnisse. Wie in Tabelle 3.6 dargestellt, wurden für die verschiedenen  $Q$ -Bereiche Fehler im Bereich zwischen (+/-) 0,5 h bei  $Q = 1,0$  bis 0,5 bis maximal (+/-) 1,5 h bei  $Q = 0,3$  bis 0,2 berechnet.

#### 3.2.1 Verwendung korrekter $T_{(a)}$ und abweichender Werte $\pm 1\text{ }^{\circ}\text{C}$

Die reale  $T_{(a)}$  war hierbei bekannt. Es wurden Berechnungen für die reale  $T_{(a)}$  durchgeführt. Da es in der Praxis auch zu einer Fehlannahme dieser kommen kann, wurden auch Berechnungen für (+/-)  $1\text{ }^{\circ}\text{C}$  durchgeführt. Bei Fehlannahme der  $T_{(a)}$  als zu hoch oder niedrig ergaben sich die in den Abbildungen 3.15, 3.16 und 3.17 dargestellten Ergebnisse. Es kam hierbei zu einer zunehmenden Unter- (Todeszeit zu kurz im Vergleich zur gemessenen Todeszeit) bzw. Überschätzung (Todeszeit zu lang im Vergleich zum gemessenen Wert).

Bei Überschätzung der  $T_{(a)}$  um  $1\text{ }^{\circ}\text{C}$  zeigte sich eine über die Kühlzeit zunehmende Unterschätzung der Todeszeit.

Bei Unterschätzung der  $T_{(a)}$  um  $1\text{ }^{\circ}\text{C}$  zeigte sich eine über die Kühl-

<sup>1</sup> Startpunkt des Abkühlens des Kühldummies

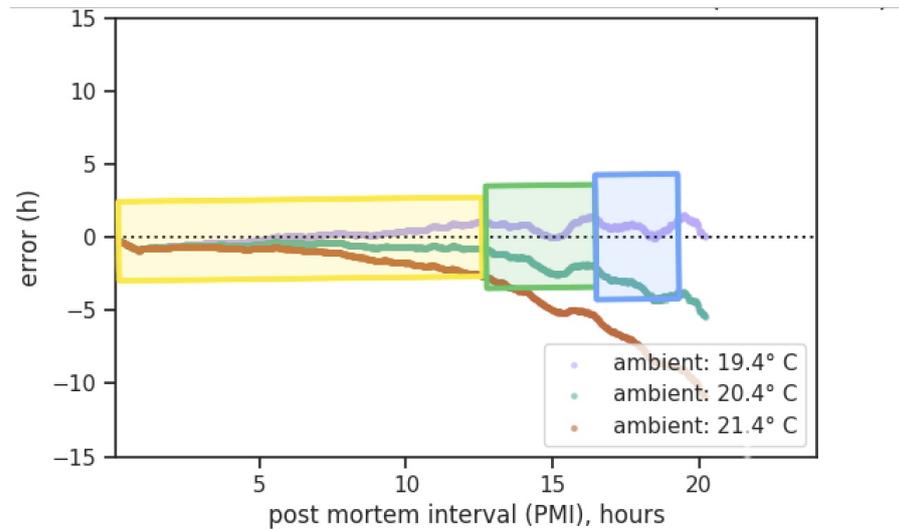


Abbildung 3.15: Berechneter Fehler im Verlauf der Abkühlung bei normaler  $T_{(r@D)}$  / Kühldummy „2c“. Die farbigen Rechtecke entsprechen hierbei den Intervallgrenzen nach HENSSGE.

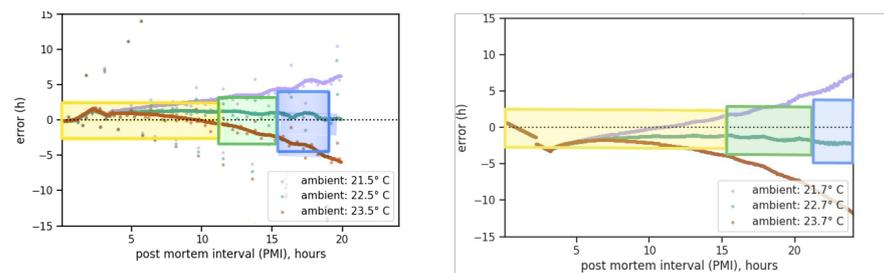


Abbildung 3.16: Berechneter Fehler im Verlauf der Abkühlung bei erhöhter (rechte Abb.) und normaler  $T_{(r@D)}$  (linke Abb.) / Kühldummy „1a“. Die farbigen Rechtecke entsprechen hierbei den Intervallgrenzen nach HENSSGE.

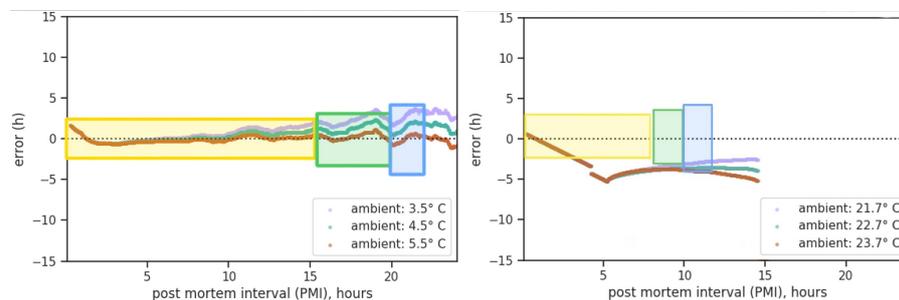


Abbildung 3.17: Berechneter Fehler im Verlauf der Abkühlung bei erhöhter (rechte Abb.) und normaler  $T_{(r@D)}$  (linke Abb.) / Kühldummy „3a“. Die farbigen Rechtecke entsprechen hierbei den Intervallgrenzen nach HENSSGE.

zeit zunehmende Überschätzung der Todeszeit.

### 3.2.2 Verwendung erhöhter $T_{(r@D)}$

Die Methode nach HENSSGE geht von einer  $T_{(r@D)}$  von  $37,2\text{ °C}$  zum Todeszeitpunkt aus. In der Praxis kommt es jedoch häufig zu Abweichungen von diesem Wert. Es erfolgte daher auch eine Fehlerberechnung mit erhöhten Werten.

Bei Vorliegen einer nicht-erhöhten  $T_{(r@D)}$  zum Todeszeitpunkt ergab sich ein über die Zeit kaum zunehmender Fehler. Wie in Abb. 3.16 und 3.17 gezeigt, lag der für das BF berechnete Fehler hierbei während der gesamten Abkühlung innerhalb der Intervallgrenzen nach HENSSGE.

Die Verwendung des „ignorant-Berechnungsansatzes“<sup>2</sup> führte zu einer zunehmenden Unterschätzung (Todeszeit wird zu kurz angenommen) der Todeszeit im Verlauf der Kühlung (siehe 3.16 und 3.17). Dies resultierte hierbei aus einem Berechnungsartefakt, da innerhalb der Formel nach HENSSGE erst für eine  $T_{(r@D)}$  von  $37,2\text{ °C}$  eine Berechnung der Todeszeit möglich ist. Diese Unterschätzung zeigte sich auch durch eine Verschiebung des Erwartungswertes (=gemessener Todeszeit) bei Betrachtung der erhöhten Fälle (-0,56 Stunden bei erhöhter  $T_{(r@D)}$  gegenüber -0,13 Stunden bei nicht erhöhter  $T_{(r@D)}$ ).

Auch ein höheres Realgewicht führte innerhalb des „ignorant-Berechnungsansatzes“ (bei erhöhter  $T_{(r@D)}$ ) zu einer Verstärkung der Unterschätzung der Todeszeit (siehe Abbildungen 3.16 und 3.17).

### 3.2.3 Darstellung der berechneten Fehlerstreuung in Form von Histogrammen für verschiedene Szenarien

In den Abb. 3.18 und 3.19 ist die Standardfehlerverteilung der als „leicht“ und der als „mittelschwer“ klassifizierten Dummies unter Verwendung der Standardbedingungen von HENSSGE in Form von Histogrammen dargestellt. Hierbei wurde untersucht, wie sich das Realgewicht der untersuchten Kühldummies auf deren Kühlverhalten und die daraus resultierende Fehlerstreuung des Standardfehlers auswirkt. Die Berechnung der folgenden Tabellen und graphische Darstellung der Werte in Form von Histogrammen erfolgte hierbei automatisiert über verschiedene PYTHON-Skripte.

<sup>2</sup> Im ignorant Berechnungsansatz erfolgte keine Beachtung einer erhöhten  $T_{(r@D)}$ , obwohl uns diese zu Beginn der Abkühlung bekannt war. Der Startwert für die Abkühlung lag hierbei der Formel nach HENSSGE entsprechend bei  $37,2\text{ °C}$ .

Tabellarische Übersicht über die berechneten Werte bieten hierbei 3.8 und 3.9.<sup>3</sup> 3.7 vergleicht hierbei die berechneten Ergebnisse mit den Intervallgrenzen nach HENSSGE. Hierbei wurden größtenteils gleichwertige bzw. bessere Ergebnisse (engere 2 SD Intervalle) erzielt als durch die NM-Methode nach HENSSGE.

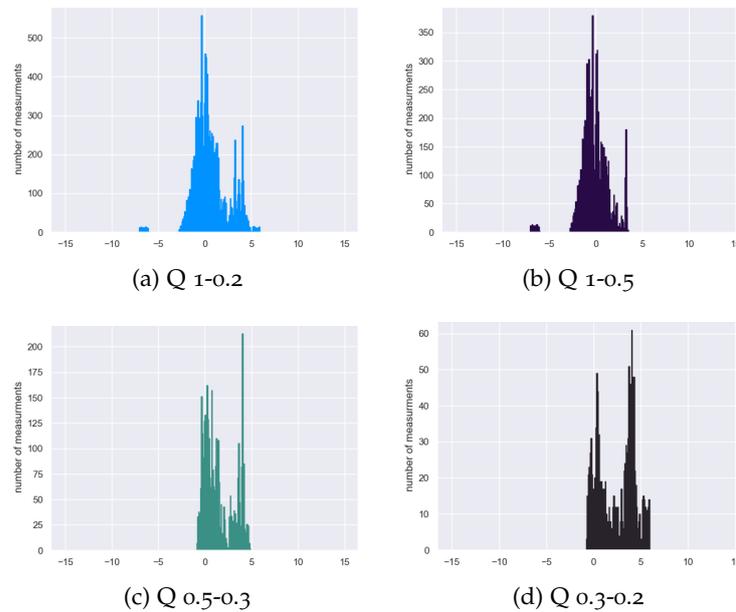


Abbildung 3.18: Fehlerverteilung der leichten Dummies,  $n = 11$ , Umgebungstemperatur 0 bis 10 °C. Auf der x-Achse ist der Fehler in Stunden abgebildet. Auf der y-Achse ist die Häufigkeit des jeweiligen Fehlers abgebildet.

### 3.2.4 Histogramme für verschiedene $T_{(a)}$ -Bereiche unter Standardbedingungen

Für verschiedene  $T_{(a)}$ -Szenarien (warm, positive  $T_{(a)}$ , niedrig-positive  $T_{(a)}$  und negative  $T_{(a)}$ ) wurden erneut durch ein PYTHON-Skript automatisierte Ergebnisberechnungen durchgeführt. Die graphische Darstellung erfolgte dabei in Form von Histogrammen (3.20, 3.21 und 3.23). Die Berechnungsergebnisse (2 SD-Intervalle, Kühlminuten und dazugehöriger statistischer Erwartungswert) wurden weiterhin automatisiert in den Tabellen 3.10, 3.11, 3.12 und 3.13 aufgetragen.

<sup>3</sup> Der dargestellte Erwartungswert entspricht hierbei nicht dem Erwartungswert nach HENSSGE, sondern ist ein statistisches Tool, um eine Über- bzw. Unterschätzung der Todeszeit zu beurteilen.

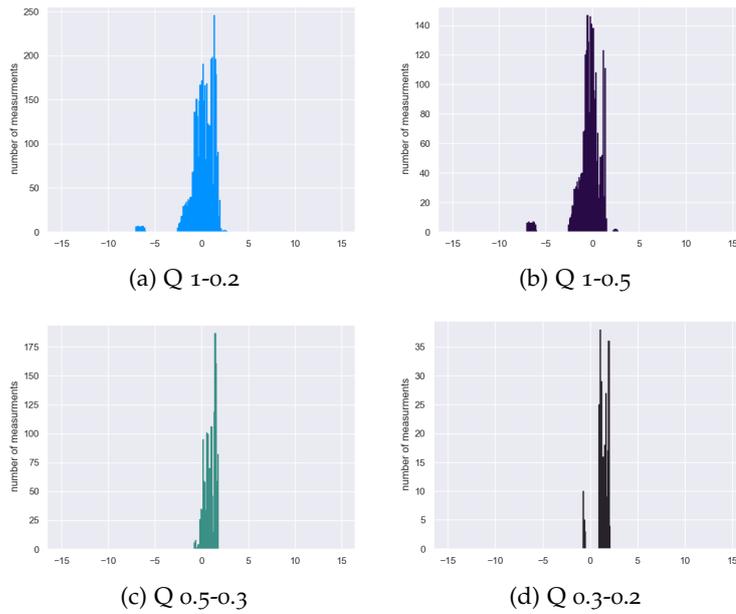


Abbildung 3.19: Fehlerverteilung der mittelschweren Dummies,  $n = 4$ , Umgebungstemperatur 0 bis 10 °C. Auf der x-Achse ist der Fehler in Stunden abgebildet. Auf der y-Achse ist die Häufigkeit des jeweiligen Fehlers abgebildet.

Bei Verwendung einer warmen  $T_{(a)}$  im Bereich  $>23$  °C ergaben sich die in der Grafik 3.20 und der Tabelle 3.10 dargestellten Ergebnisse.

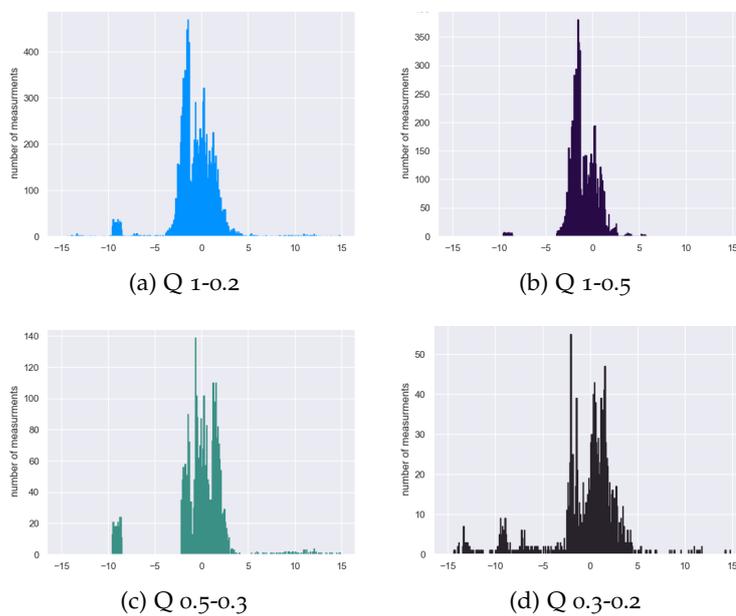


Abbildung 3.20: Alle Dummies bei warmer  $T_{(a)}$  /  $n=13$ . Auf der x-Achse ist der Fehler in Stunden abgebildet. Auf der y-Achse ist die Häufigkeit des jeweiligen Fehlers abgebildet.

Der Bereich der späten Abkühlung (unterhalb von  $Q=0,5$ ) ist hierbei besonders interessant, weil die konventionelle Methode nach HENS-  
SGE hier keine Möglichkeit zur Todeszeitberechnung bietet. Hierbei wurden 2SD-Intervalle zwischen 6,08 h ( $Q = 0,5$  bis  $0,3$ ) und 7,5 h ( $Q=0,3$  bis  $0,2$ ) bestimmt. Die statistischen Erwartungswerte zeigten hierbei eine leichte Unterschätzung der Todeszeit (-0,1 h und -0,48 h).

Für die Verwendung einer positiven  $T_{(a)}$  im Bereich zwischen  $>23$  bis  $>10$  °C sind die Ergebnisse in der Grafik 3.20 und der dazugehörigen Tabelle 3.11 dargestellt.

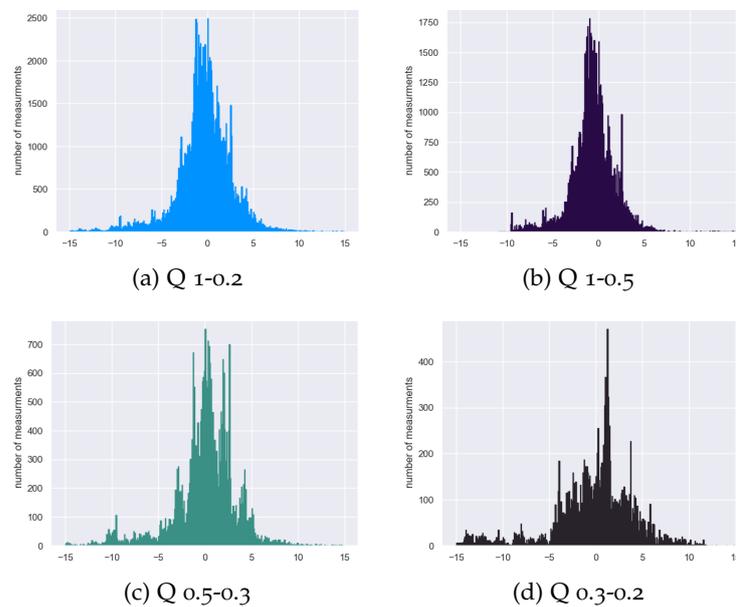


Abbildung 3.21: Alle Dummies bei positiver  $T_{(a)}$ . Auf der x-Achse ist der Fehler in Stunden abgebildet. Auf der y-Achse ist die Häufigkeit des jeweiligen Fehlers abgebildet.

Für die Verwendung einer niedrigpositiven  $T_{(a)}$  im Bereich zwischen 0 bis 10 °C ergaben sich die in der Grafik 3.22 und der Tabelle 3.12 dargestellten Ergebnisse.

Bei Verwendung einer negativen  $T_{(a)}$  ergaben sich Ergebnisse im Bereich zwischen 5,2 h (frühe Abkühlung /  $Q = 1,0$  bis  $0,5$ ) und 7,7 h (späte Abkühlung /  $Q = 0,3$  bis  $0,2$ ). Von HENS-  
SGE waren in diesem Bereich zur Etablierung der NM-Methode keine Versuche durchgeführt worden, sodass diese Ergebnisse nur teilweise mit den Intervallgrenzen vergleichbar sind.

Die statistischen Benchmarks der NM-Methode wurden hierbei im

„ignorant-Berechnungsansatz“ noch nicht komplett erreicht. Es zeigte sich im Bereich aller verwendeten  $T_{(a)}$  eine Unterschätzung des Erwartungswertes (z.B. in 3.13) mit verbreiterten 2SD-Intervallen. Die Unterschätzung des Erwartungswertes basiert hierbei auf den erhöhten  $T_{(r@D)}$ , die einige Kühldummies zum Beginn der Abkühlung aufwiesen. Auch HENSSGE und ALTHAUS fiel die Einstellung der verwendeten Kühldummies auf 37,2 °C schwer. Die Formulierung eines Lösungsansatzes war ihnen hierbei nicht möglich.

Die Verwendung des im BF implementierten „educated-Berechnungs-

ansatzes“<sup>4</sup> kann hierbei zu einer Verbesserung der Ergebnisse führen (siehe Abbildung der Fehlerberechnung bei den Schweinen (3.31, 3.32 und 3.33)).

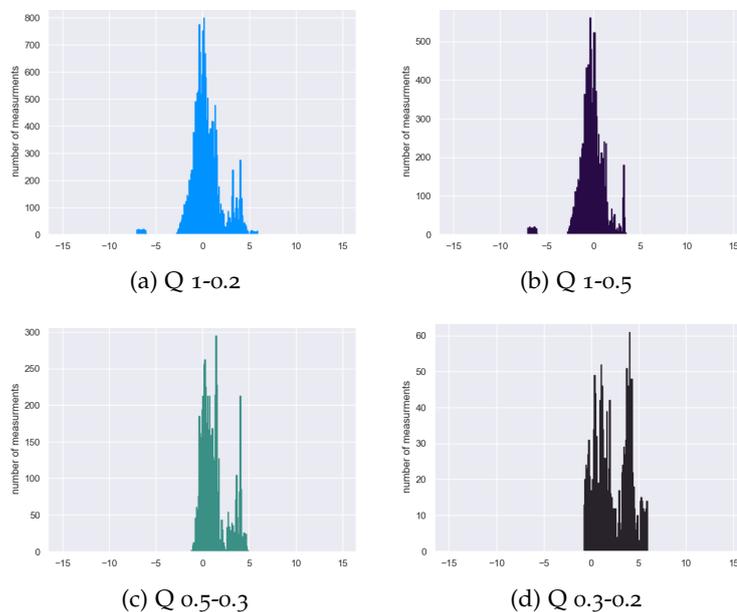


Abbildung 3.22: Alle Dummies bei niedrig-positiver  $T_{(a)}$ . Auf der x-Achse ist der Fehler in Stunden abgebildet. Auf der y-Achse ist die Häufigkeit des jeweiligen Fehlers abgebildet.

### 3.2.5 Vergleichende Fehlerverteilung bei erhöhter $T_{(r@D)}$ und normaler $T_{(r@D)}$ unter Standardbedingungen

Um die Auswirkung einer erhöhten  $T_{(r@D)}$  auf die statistischen Benchmarks zu untersuchen, wurden 47 Experimente bei erhöhter  $T_{(r@D)}$

<sup>4</sup> Eine erhöhte  $T_{(r@D)}$  wird durch Analyse der CWC-Form erkannt und 37,2 °C werden durch einen höheren Wert in der Formel ersetzt.

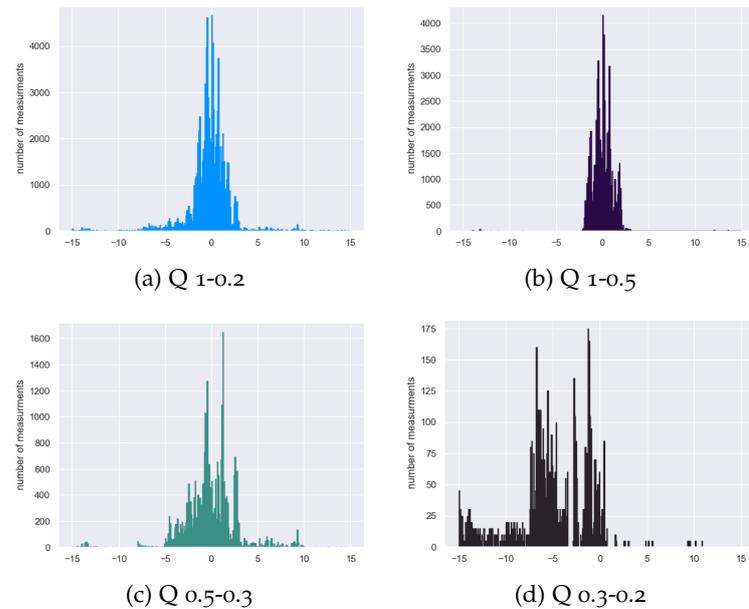


Abbildung 3.23: Alle Dummies bei negativer  $T_{(a)}$ . Auf der x-Achse ist der Fehler in Stunden abgebildet. Auf der y-Achse ist die Häufigkeit des jeweiligen Fehlers abgebildet.

(> 38 °C) durchgeführt. Eine automatisierte Berechnung der statistischen Benchmarks mittels PYTHON-Skripts erfolgte dann im „ignorant-Berechnungsansatz“. Hierbei ergab sich eine anhaltende Unterschätzung der Todeszeit über den Verlauf der Kühlung (siehe Erwartungswerte in Tabelle 3.14). Weiterhin kam es durch die Verwendung des ignorant-Berechnungsansatzes (keine Beachtung der erhöhten  $T_{(r@D)}$ ) zu einer Verbreiterung der 2SD-Intervalle (siehe Tabelle 3.14).

Für normale  $T_{(r@D)}$ -Werte (37 °C - 38 °C) wurden anhand von 37 Experimenten Berechnungstabellen erstellt. Auch die graphische Auftragung in Form von Histogrammen erfolgte hierbei automatisiert. Hierbei ergab sich eine leichte Unterschätzung der Todeszeit über den gesamten Verlauf der Kühlung. Die berechneten Werte für die 2 SD-Intervalle lagen hierbei über den gesamten Zeitraum der Abkühlung innerhalb der Intervallgrenzen nach HENSSGE (siehe Tabelle 3.15).

### 3.2.6 Verwendung unterschiedlicher Korrekturfaktoren im Bereich $CF > 1$ und $CF < 1$

Innerhalb der Experimente wurden unterschiedliche Kühlbedingungen aus der Tabelle nach HENSSGE hergestellt. Diese Experimente wurden automatisiert der statistischen Fehlerevaluation zugeführt. Die statistischen Benchmarks wurden hierfür tabellarisch aufgetragen, und graphisch als Histogramme dargestellt. Hierbei wurde zwi-

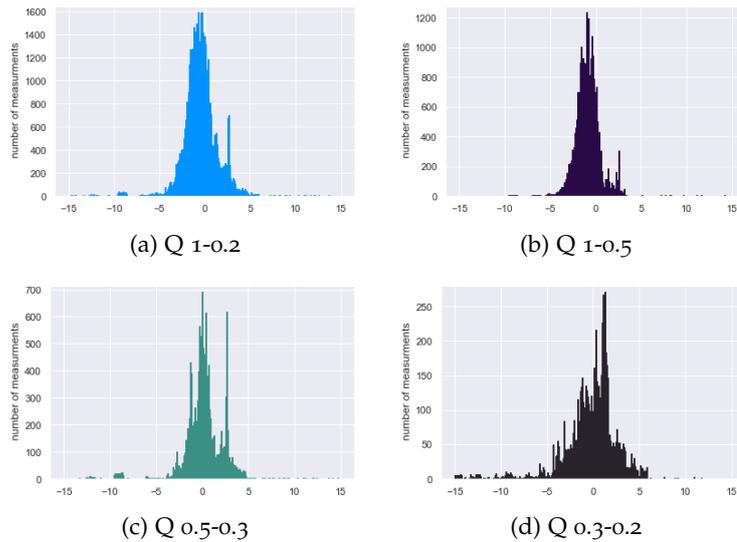


Abbildung 3.24: Alle Dummys Rektaltemperatur bei Tod  $> 38$  °C. Auf der x-Achse ist der Fehler in Stunden abgebildet. Auf der y-Achse ist die Häufigkeit des jeweiligen Fehlers abgebildet.

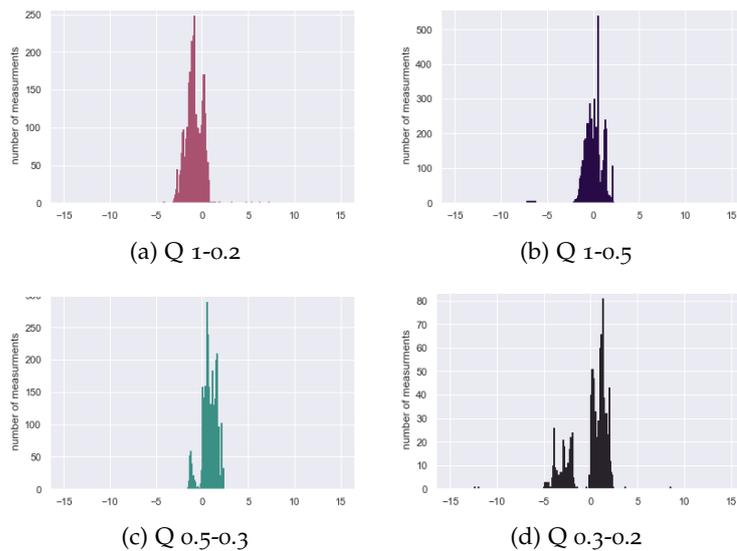


Abbildung 3.25: Mittelschwere Dummys bei Rektaltemperatur bei Tod zwischen  $37$  °C -  $38$  °C. Auf der x-Achse ist der Fehler in Stunden abgebildet. Auf der y-Achse ist die Häufigkeit des jeweiligen Fehlers abgebildet.

schen  $CF > 1$ , die die Abkühlung beschleunigen (z.B. Bedeckung mit feuchter OP-Kleidung) und  $CF > 1$ , die die Abkühlung verlangsamen (z.B. Bedeckung mit Bettdecke) unterschieden. Insgesamt wurden 37 Experimente durchgeführt, welche das Kriterium  $CF < 1$  erfüllten.

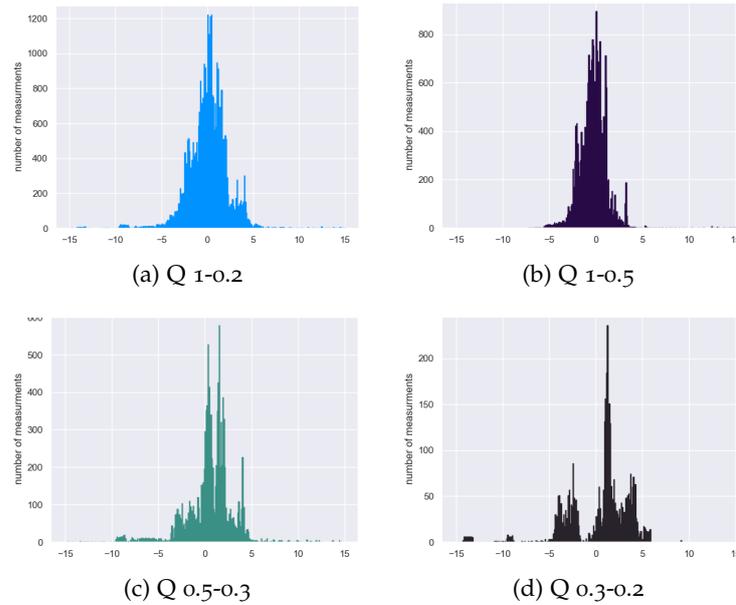


Abbildung 3.26: Alle Dummies (Korrekturfaktor kleiner eins). Auf der  $x$ -Achse ist hierbei der Fehler in  $h$  abgebildet. Auf der  $y$ -Achse ist die Häufigkeit des jeweiligen Fehlers abgebildet.

Weiterhin wurden insgesamt 27 Experimente durchgeführt, welche das Kriterium  $CF > 1$  erfüllen.

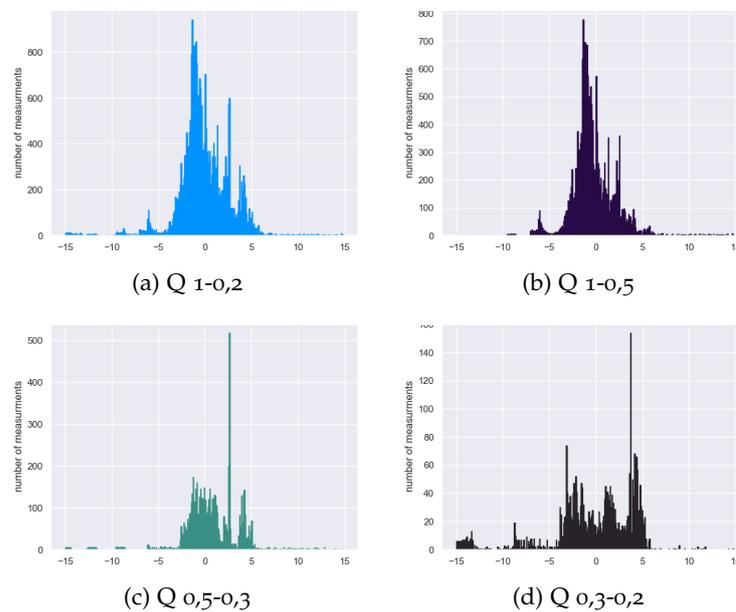


Abbildung 3.27: Alle Dummies (Korrekturfaktor größer eins). Auf der  $x$ -Achse ist hierbei der Fehler in  $h$  abgebildet. Auf der  $y$ -Achse ist die Häufigkeit abgebildet.

Bei Verwendung von  $CF > 1$  zeigte sich eine durchgehende Unterschätzung der Todeszeit mit verbreiterten 2 SD-Intervallen (siehe 3.17 und 3.27). Innerhalb der ungeplanten „broken-experiments“ bei Verwendung des CF „Bedeckung mit einer Lage feucht“ konnten hierbei Ergebnisse berechnet werden, was über die Methode nach HENSSGE nicht möglich ist (siehe 3.16 und 3.26).

### 3.3 AUSWERTUNG KÜHLDATEN AUS VERSUCHEN AM SCHWEINEMODELL

Es erfolgte eine automatisierte Auswertung der Kühlzeiten aus den Experimenten am Schweinmodell. Hierbei wurden erneut CWC (Kühlgewicht in Abhängigkeit von der Zeit) graphisch abgebildet. Weiterhin erfolgte eine statistische Auswertung der gewonnenen Daten hinsichtlich der Breite der berechneten 2 SD-Intervalle und der Lage des Erwartungswertes.

Hierbei entsprachen die Kühlbedingungen für alle Schweine (ausgenommen S18) den Standardbedingungen nach HENSSGE (keine Bedeckung, Aufliegen auf einer temperaturstabilen Auflage, keine besondere Feuchtigkeit und kein Luftzug). Für 13 Schweine (febrile Schweine) war die  $T_{(r@D)}$  dabei auf über  $38,0\text{ °C}$  erhöht. Die maximale  $T_{(r@D)}$  betrug  $39,5\text{ °C}$  (S11).

Im Unterschied zu den Berechnungen für die Kühldummies wurde bei den Schweinen ein zweiter Berechnungsmodus („educated-Modus“) angewendet. Hierbei wird eine erhöhte  $T_{(r@D)}$  über die Analyse der CWC-Form (steiler Anstieg zu Beginn) erkannt. Die Berechnungsformel nach HENSSGE wird für diese Fälle auf einen Wert von  $38,0\text{ °C}$  angepasst. Die Annahme einer erhöhten  $T_{(r@D)}$  hat hierbei Auswirkungen auf die Breite der von  $Q$  abhängigen Intervalle und die verwendete Gesamtkühlzeit (siehe 3.18).

#### 3.3.1 CWC-Formen bei Annahme der $T_{(a)}$ mit korrektem Wert und $\pm 1\text{ °C}$ am Schweinmodell

Der charakteristische horizontale Verlauf einer CWC, der bei korrekter Annahme aller Parameter auftritt, konnte bei allen Schweinen bestätigt werden. In der Abbildung 3.28 ist diese charakteristische horizontale Form der CWC als grüne Kurve dargestellt.

Die Annahme der  $T_{(a)}$  mit einem Wert ( $+ 1\text{ °C}$ ) führte hierbei zu einer negativen Steigung der CWC (Kühlgewicht des Schweines wird über die Zeit immer geringer). Die Annahme einer  $T_{(a)}$  mit einem Wert von ( $- 1\text{ °C}$ ) führt zu einer positiven Steigung über den Zeitraum der Abkühlung (Kühlgewicht des Schweines wird über die Zeit immer schwerer).

Bei den febrilen Schweinen konnte der initiale Anstieg der CWC bei Anwendung des „ignorant-Berechnungsansatzes“ nachgewiesen werden (siehe 3.28). Der initiale Anstieg konnte maximal 6,5 h nach Experimentbeginn (=Todeszeitpunkt) nachgewiesen werden.

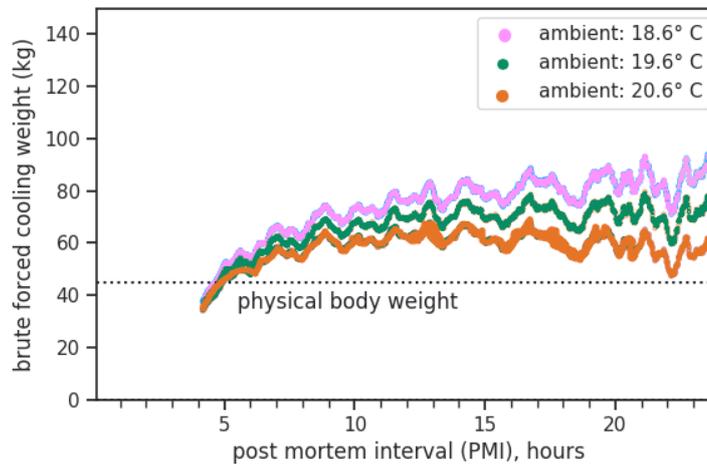


Abbildung 3.28: CWC von Schwein 14 bei drei unterschiedlichen  $T_{(a)}$ . Orangene Kurve = korrekte  $T_{(a)}-1$  °C, grüne Kurve = korrekte  $T_{(a)}$  und violette Kurve = korrekte  $T_{(a)}+1$  °C.

### 3.3.2 Kühlgewichte unter Standardbedingungen und Verwendung von CF „Bedeckung mit Bettdecke“ am Schweinmodell

Minimal wurde unter Standardbedingungen ein Kühlgewicht von 40 kg berechnet (S5 / S17). Maximal wurde ein Kühlgewicht von 110 kg (S18) bei Verwendung des CF „Bedeckung mit einer Bettdecke“ (tabellarischer CF nach HENSSGE = 1,8) berechnet. Der von uns berechnete CF (ohne Gewichtsskalierung auf 70 kg) entspricht hierbei ebenfalls einem Wert von etwa 1,8.

### 3.3.3 Sonderfälle

Bei S5 und S17 wurde innerhalb der Berechnungen festgestellt, dass ihr Kühlgewicht geringer ist, als ihr Realgewicht. Bei S5 lag das Realgewicht bei 42,5 kg und das Kühlgewicht bei 40,0 kg. Bei S17 lag das Realgewicht bei 45,0 kg und das Kühlgewicht bei 40,0 kg. Hierbei ist von einem Messfehler auszugehen, da das Kühlgewicht bei Vorliegen von Standardbedingungen (CF=1) rein rechnerisch keinen kleineren Wert, als das Realgewicht, annehmen kann<sup>5</sup>.

<sup>5</sup> Ursächlich war hierbei wahrscheinlich die Obduktion zur toxikologischen Probenentnahme, die durch Darmverdrehungen zu einem erschwerten, rektalen Einführen der Temperatursonden geführt hatte (siehe Diskussion).

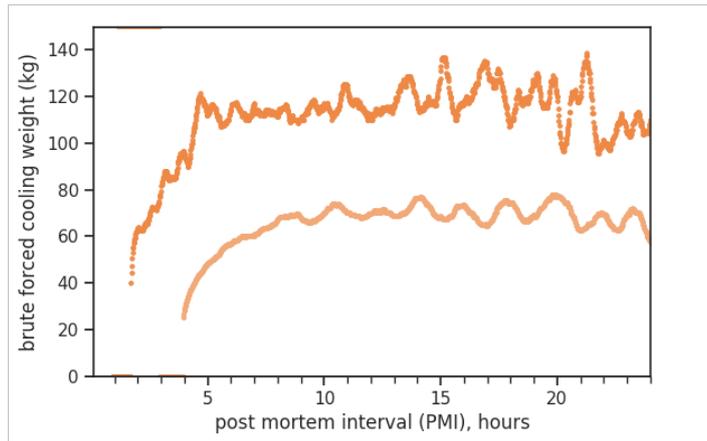


Abbildung 3.29: Vergleich der CWC von S18 mit Bettdecke und S14 unbedeckt. Die hellorange Kurve entspricht hierbei dem Kühlgewicht über den Verlauf der Abkühlung unter Standardbedingungen bei S14. Die dunkelorange Kurve stellt die CWC von S18 bei Bedeckung mit einer handelsüblichen Bettdecke dar.

#### 3.3.4 Fehlerberechnung und statistische Benchmarks am Schweinemodell

Auch für die Schweine erfolgte eine automatisierte Berechnung der statistischen Benchmarks und deren Auftragung in tabellarischer Form. Hierbei erfolgte eine Gegenüberstellung der berechneten 2 SD-Intervalle und dazugehörigen Erwartungswerte für den „educated Berechnungsansatz“ und den „ignorant Berechnungsansatz“ (siehe 3.19). Ein graphischer Vergleich der dazugehörigen Fehlerverteilung erfolgte in Form eines KDE-Plots (siehe 3.31, 3.32 und 3.33).

Im Gegensatz zu der Methode nach HENSSGE war die Berechnung der Todeszeit bei allen Schweinen möglich.

Hierbei zeigte sich im „ignorant Berechnungsansatz“ eine Überschätzung der Todeszeit (Erwartungswert: 1,7 h bei  $Q = 1,0$  bis 0,5, 1,6 h bei  $Q = 0,5$  bis 0,3, 6,18 h bei  $Q = 0,3$  bis 0,2). Ebenfalls waren die 2 SD - Intervalle im Vergleich mit den Intervallgrenzen nach HENSSGE verbreitert (siehe 3.19). Die Verwendung des „educated Berechnungsansatzes“ führte zu einer geringeren Überschätzung der Todeszeit (siehe Tabelle 3.19). Ebenfalls konnte die Verbreiterung der 2 SD-Intervalle, besonders im Zeitraum der frühen Abkühlung, reduziert werden.

In den Abb. 3.31, 3.32 und 3.33 ist hierbei die Wirkung des „educated Berechnungsansatzes“ auf die Todeszeit (Erwartungswert) und die Breite der 2 SD-Intervalle dargestellt. Besonders bei den febrilen Schweinen (S3, S7, S11, S12, S15 und S17), die nur eine geringe Erhöhung der  $T_{(r@D)}$  über  $38,0$  °C aufwiesen, führte der „educated Berechnungsansatz“ zu einer Abnahme der Verbreiterung der 2 SD-

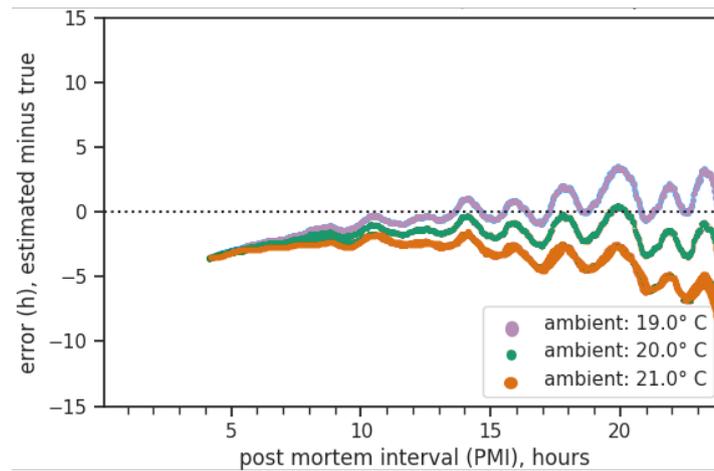


Abbildung 3.30: Fehlerkurve von Schwein 14 bei drei unterschiedlichen  $T_{(a)}$

Intervalle. Ebenfalls konnte in diesen Fällen die Überschätzung der Todeszeit reduziert werden (siehe rote Kurve in entsprechenden Fällen in 3.31, 3.32 und 3.33).

Bei den „nicht-febrilen“ Schweinen führte die Anwendung des „educated Berechnungsansatzes“ zu keiner Verbesserung der statistischen Benchmarks<sup>6</sup>. Insgesamt führte die Verwendung des „educated Berechnungsansatzes“ zu einer Verschmälerung der 2 SD-Intervalle und einen Rückgang der Überschätzung der Todeszeit (weniger Rechtsverschiebung innerhalb des Histogramms) (siehe Abb. 3.31, 3.32 und 3.33).

Für die „febrilen-Schweine“ mit einer deutlichen Temperaturerhöhung der  $T_{(r@D)}$  über  $38,0\text{ °C}$  ( $S_2$ ,  $S_4$ ,  $S_{10}$ ,  $S_{13}$ ) führte der „educated Berechnungsansatz“ zu einer geringeren Verbesserung der statistischen Benchmarks (2 SD-Intervalle weiterhin verbreitert, Todeszeit weiterhin stärker überschätzt, als bei anderen febrilen Schweinen mit  $T_{(r@D)}$  um die  $38,0\text{ °C}$ ). In solchen Sonderfällen (stark erhöhte  $T_{(r@D)}$ ) könnte die Annahme mit einem höheren Wert ( $>38,0\text{ °C}$ ) zu einer Verbesserung der statistischen Benchmarks führen (siehe Diskussion).

<sup>6</sup> Dies ist darüber zu erklären, dass der „educated Berechnungsansatz“ innerhalb der Schweinekühlexperimente eine  $T_{(r@D)}$  von  $38,0\text{ °C}$  annimmt, und somit die eigentliche  $T_{(r@D)}$  zum Todeszeitpunkt überschätzt wird.

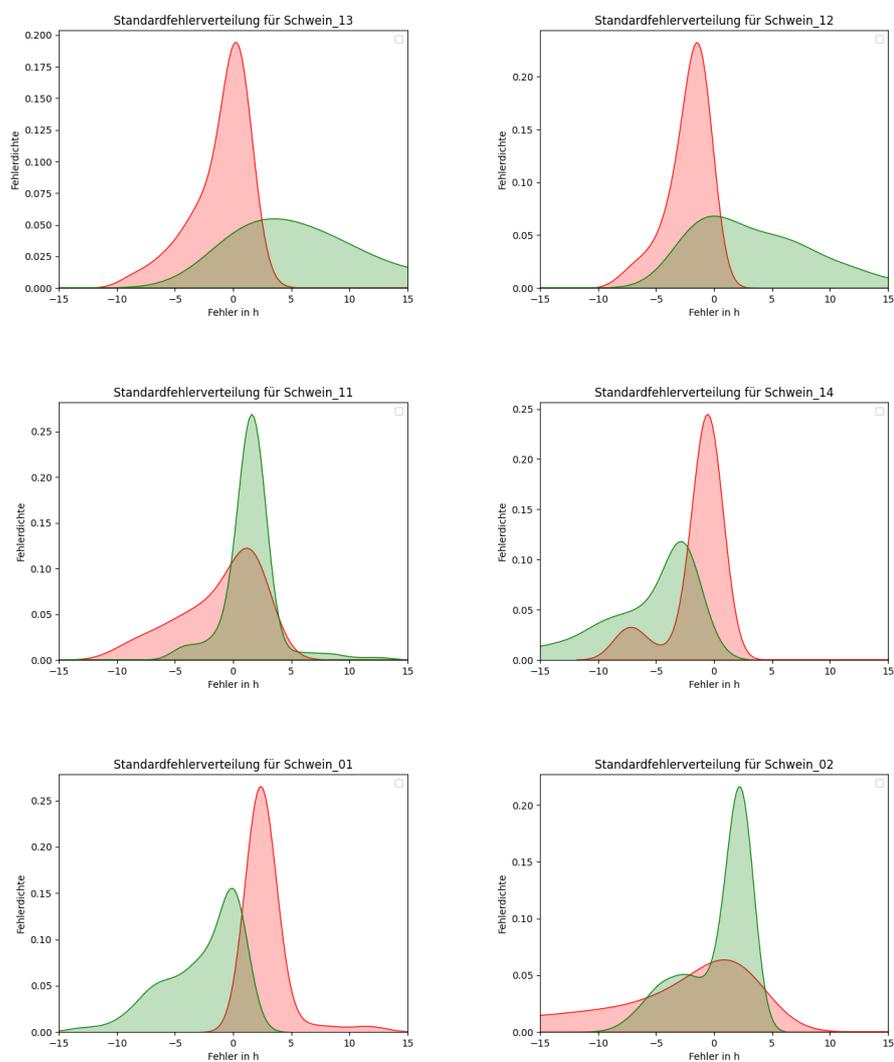


Abbildung 3.31: Teil I: Vergleichende Fehlerverteilung innerhalb der Schweine-Kühlexperimente. Rot: „educated-Berechnungsansatz“. Grün: „ignorant-Berechnungsansatz“.

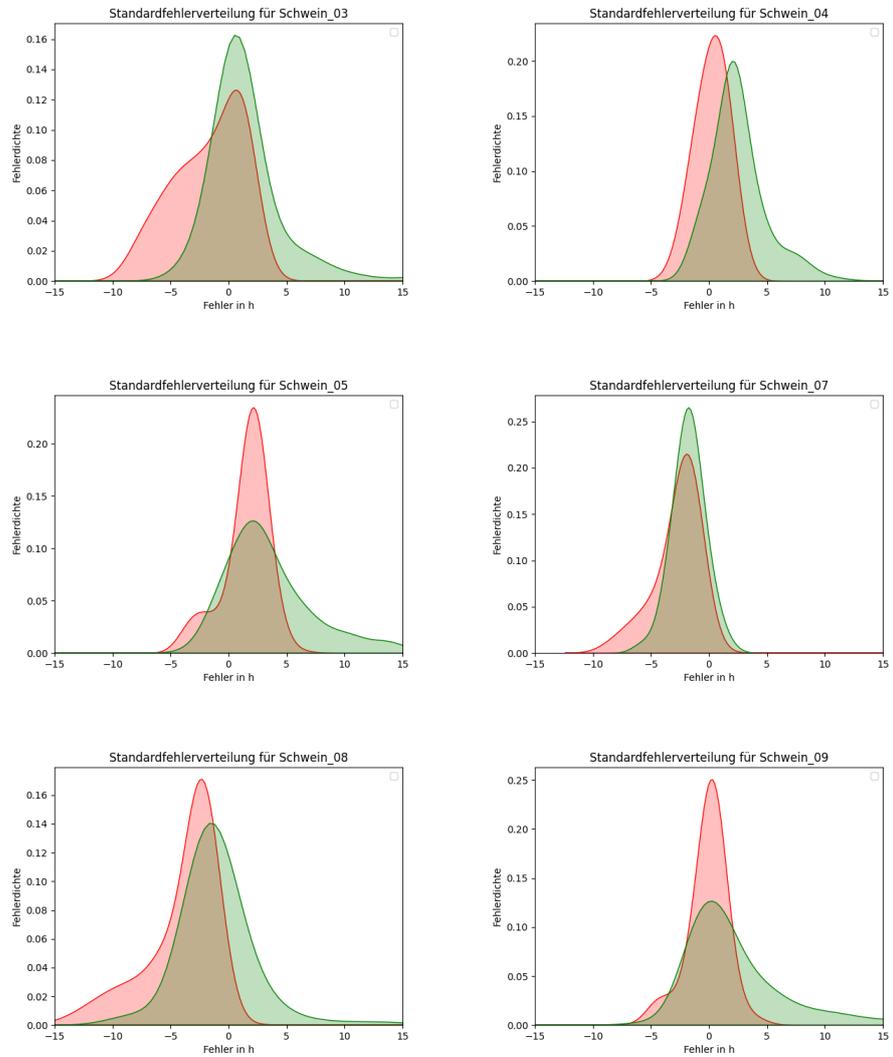


Abbildung 3.32: Teil II: Vergleichende Fehlerverteilung innerhalb der Schweine-Kühlexperimente. Rote: „educated-Berechnungsansatz“. Grün: „ignorant-Berechnungsansatz“.

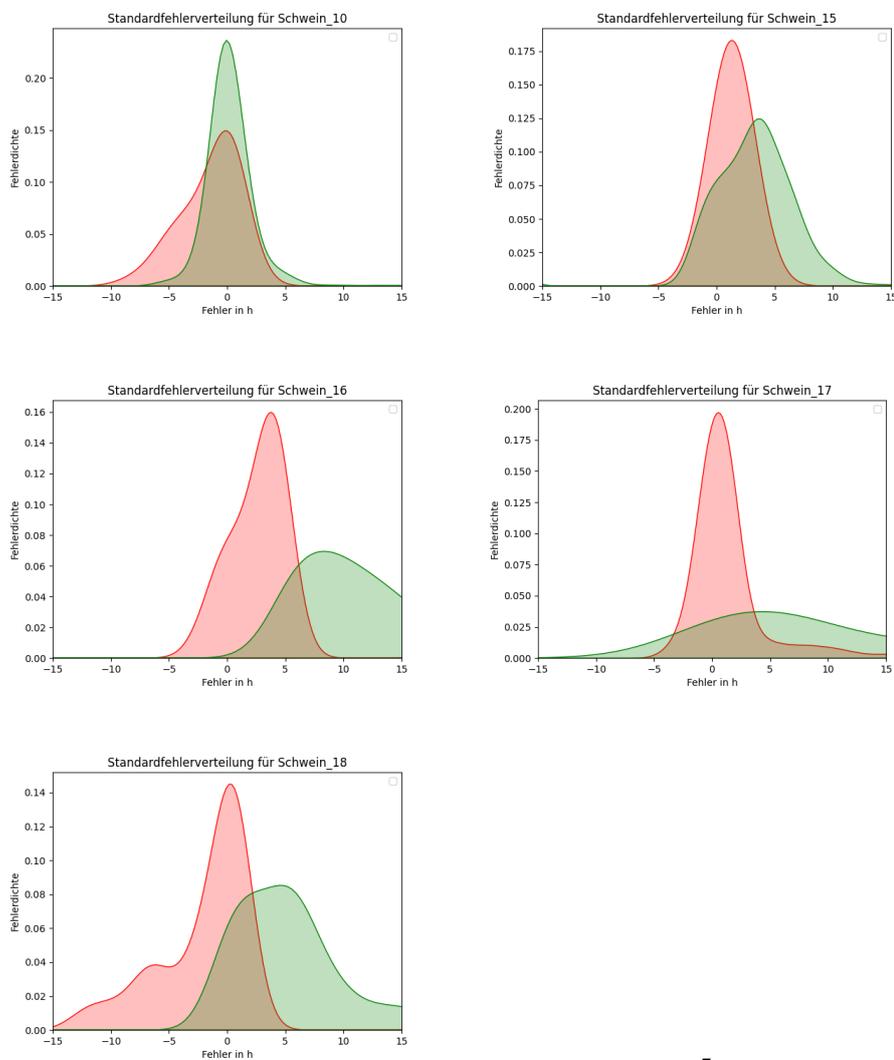


Abbildung 3.33: Teil III: Vergleichende Fehlerverteilung innerhalb der Schweine-Kühlexperimente. Rot: „educated-Berechnungsansatz“. Grün: „ignorant-Berechnungsansatz“.

| Dummy-ID          | Exp. (n) | Kühlzeit | T(r@D) | T(a) | CF |
|-------------------|----------|----------|--------|------|----|
| 1a (mittelschwer) | 15       | 386,1    |        |      |    |
| 1b (leicht)       | 14       | 398,6    |        |      |    |
| 1c (leicht)       | 15       | 375,9    |        |      |    |
| 2a (mittelschwer) | 11       | 235,6    |        |      |    |
| 2b (leicht)       | 13       | 256,5    |        |      |    |
| 2c (leicht)       | 10       | 214,6    |        |      |    |
| 3a (schwer)       | 12       | 388,8    |        |      |    |
| 3b (schwer)       | 9        | 324,9    |        |      |    |
| 4a (leicht)       | 12       | 210,2    |        |      |    |
| 4b (leicht)       | 16       | 327,8    |        |      |    |
| TOTAL             | 127      | 130 Tage |        |      |    |

Tabelle 3.1: Überblick über die prozentuale Verteilung verschiedener Kühl-szenarien auf die Gesamtzahl der durchgeführten Dummykühl-experimente.  $T_{(r@D)}$ :  $< 38\text{ }^{\circ}\text{C}$  = grüne Tortendiagramme),  $> 38\text{ }^{\circ}\text{C}$  = hellgrüne Tortendiagramme).  $T_{(a)}$ :  $< 10\text{ }^{\circ}\text{C}$ , blaue Tortendiagramme),  $10\text{-}23,2\text{ }^{\circ}\text{C}$  = hellblaue Tortendiagramme,  $> 23,2\text{ }^{\circ}\text{C}$  weiße Tortendiagramme. (CF):  $\text{CF} = 1,0$  = lila Tortendiagramme,  $\text{CF} < 1,0$  = rosa Tortendiagramme,  $\text{CF} > 1,0$  = weiße Tortendiagramme.

| Dummyname | T <sub>(a)</sub> | cw             | rbw     |
|-----------|------------------|----------------|---------|
| 1a        | > 18 °C          | 50 kg          | 11,8 kg |
| 1a        | 0-10 °C          | 55 bis 60 kg   | 11,8 kg |
| 1a        | < 0 °C           | 75 kg          | 11,8 kg |
| 1b        | > 18 °C          | 35 bis 40 kg   | 9,7 kg  |
| 1b        | 0-10 °C          | -              | 9,7 kg  |
| 1b        | < 0 °C           | -              | 9,7 kg  |
| 1c        | > 18 °C          | 45 kg          | 6,8 kg  |
| 1c        | 0-10 °C          | 50-55 kg       | 6,8 kg  |
| 1c        | < 0 °C           | 60 kg          | 6,8 kg  |
| 2a        | > 18 °C          | 40 kg          | 12,3 kg |
| 2a        | 0-10 °C          | -              | 12,3 kg |
| 2a        | < 0 °C           | 65 kg          | 12,3 kg |
| 2b        | > 18 °C          | 40 kg          | 8,6 kg  |
| 2b        | 0-10 °C          | 55 kg          | 8,6 kg  |
| 2b        | < 0 °C           | 60 kg          | 8,6 kg  |
| 2c        | > 18 °C          | 40 kg          | 8,7 kg  |
| 2c        | 0-10 °C          | -              | 8,7 kg  |
| 2c        | < 0 °C           | 60 kg          | 8,7 kg  |
| 3a        | > 18 °C          | 80 kg          | 26,9 kg |
| 3a        | 0-10 °C          | 100 bis 110 kg | 26,9 kg |
| 3a        | < 0 °C           | 80 kg          | 26,9 kg |
| 3b        | > 18 °C          | 75 - 80 kg     | 21,5 kg |
| 3b        | 0-10 °C          | -              | 21,5 kg |
| 3b        | < 0 °C           | -              | 21,5 kg |
| 4a        | > 18 °C          | 45 kg          | 8,5 kg  |
| 4a        | 0-10 °C          | -              | 8,5 kg  |
| 4a        | < 0 °C           | 55 kg          | 8,5 kg  |
| 4b        | > 18 °C          | 40 kg          | 5,9 kg  |
| 4b        | 0-10 °C          | 30 kg          | 5,9 kg  |
| 4b        | < 0 °C           | 35 kg          | 5,9 kg  |

Tabelle 3.2: Tabelle der Kühlgewichte unserer Kühldummies im Vergleich zu deren Realgewichten bei unterschiedlichen T<sub>(a)</sub>, alle Experimente wurden unter den von HENSSGE definierten Standardbedingungen durchgeführt, (-) = Kühlszenario wurde nicht durchgeführt, der Bereich von 10 bis 18 °C wurde hierbei nicht abgedeckt, da die Temperatureinstellung der T<sub>(a)</sub> innerhalb des Experimentalraums besonders in den Sommermonaten durch Nutzung des mobilen Klimageräts nur schwer realisierbar war.

| Dummy | CF              | cw ohne CF | cw mit CF    | rw      |
|-------|-----------------|------------|--------------|---------|
| 2b    | Bettdecke       | 55 - 60 kg | 110 - 120 kg | 8,6 kg  |
| 3b    | Winterjacke     | 80 kg      | 120 kg       | 21,8 kg |
| 2c    | trockene OP-Kl- | 30 - 35 kg | 45 kg        | 8,7 kg  |
| 2c    | feuchte OP-Kl.  | 50 kg      | 40 kg        | 8,7 kg  |
| 1a    | Ventilator      | 50-60 kg   | 45-50 kg     | 11,8 kg |

Tabelle 3.3: Tabelle der bestimmten Kühlgewichte unter Verwendung von CF für unterschiedliche Kühldummies - rot hinterlegte Zeilen (CF > 1), blau hinterlegte Zeilen (CF < 1), Grün hinterlegte Zeile: Problematischer CF „feuchte OP-Kleidung“, da die OP-Kleidung abtrocknete und es so zu einem broken-experiment kam (siehe Diskussion).

| Dummy | CF              | cw ohne CF | cw mit CF    | rw     |
|-------|-----------------|------------|--------------|--------|
| 4a    | trockene OP-Kl. | 45-50 kg   | 45-55 kg     | 8,5 kg |
| 4a    | Winterjacke     | 50 kg      | 60-65 kg     | 8,5 kg |
| 4a    | Ventilator      | 55-60 kg   | 25-35 kg     | 8,5 kg |
| 4a    | feuchte OP-Kl.  | 50 kg      | 45 bis 55 kg | 8,5 kg |
| 2c    | Bettdecke       | 50 kg      | 135 kg       | 8,7 kg |
| 2c    | Ventilator      | 50 kg      | 40 kg        | 8,7 kg |

Tabelle 3.4: Tabelle der bestimmten Kühlgewichte für Kühldummy „2c“ (weiß hinterlegt) und „4a“ (grau hinterlegt) in 3.12. Hellgrün hinterlegte Zeile: Problematischer CF „feuchte OP-Kleidung“, da die OP-Kleidung abtrocknete und es so zu einem broken-experiment kam (siehe Diskussion).

| CF              | CF(BF) | CF70(BF) | CF*  | CF70* |
|-----------------|--------|----------|------|-------|
| trockene OP-Kl. | 1,0    | 1,028    | 1,1  | 0,778 |
| Winterjacke     | 1,25   | 1,28     | 1,4  | 1,45  |
| Bettdecke       | 1,71   | 1,57     | 1,8  | 2,11  |
| Ventilator      | 0,71   | 0,73     | 0,75 | 0,74  |
| feuchte OP-Kl.  | 1,09   | 1,11     | 0,7  | 0,70  |

Tabelle 3.5: Ergebnisse der CF bzw. CF70-Berechnungen aus den Abb. 3.13 und 3.14. \* nach HENSSGE; Kl. (Kl.) = Kleidung

| Dummy                | Q = 1,0 bis 0,5 | Q = 0,5 bis 0,3 | Q = 0,3 bis 0,2 |
|----------------------|-----------------|-----------------|-----------------|
| 1a                   | 1,0 h           | 1,5 h           | 1,0 h           |
| 2c                   | 0,5 h           | 0,5 h           | 0,5 h           |
| 3a                   | 0,5 h           | 1,0 h           | 1,0 h           |
| HENSSGE Standardbed. | 2,8 h           | 3,2 h           | 4,5 h           |

Tabelle 3.6: Intervallgrenzen der mittels Bruteforcing-Methode bestimmten von Q abhängigen Intervalle im Vergleich mit den Intervallgrenzen nach HENSSGE

| Dummy-Gruppe | Q-Bereich | Fehler* (2 SD) | Intervallbreite (2 SD) |
|--------------|-----------|----------------|------------------------|
| leicht       | 1,0 - 0,5 | 2,8 h          | 3,08 h                 |
| leicht       | 0,5 - 0,3 | 3,2 h          | 3,2 h                  |
| leicht       | 0,3 - 0,2 | 4,5 h          | 3,84 h                 |
| mittel       | 1,0 - 0,5 | 2,8 h          | 2,62 h                 |
| mittel       | 0,5 - 0,3 | 3,2 h          | 1,16 h                 |
| mittel       | 0,3 - 0,2 | 4,5 h          | 1,3 h                  |

Tabelle 3.7: Überblick über die für die leichten bzw. mittelschweren Kühldummies berechneten Fehler (2 SD) im Vergleich zu den Intervallgrenzen nach HENSSGE, (\*) entspricht nach HENSSGE

| Q-Bereich | Kühlzeit        | $\mu$ | $\pm 2$ SD | $\pm 2$ SD HENSSGE |
|-----------|-----------------|-------|------------|--------------------|
| 1,0-0,5   | 7074 (117,9 h)  | -0,17 | 3,08       | 2,8                |
| 0,5-0,3   | 3484 (58,1 h)   | 1,49  | 3,2        | 3,2                |
| 0,3-0,2   | 1251 (20,9 h)   | 2,44  | 3,84       | 4,5                |
| 1,0-0,2   | 11809 (196,8 h) | 0,6   | 3,76       | -                  |

Tabelle 3.8: Kühlminuten und statistische Maßzahlen für leichte Kühldummies.  $\mu$  = Erwartungswert

| Q-Bereich | Kühlzeit      | $\mu$ | $\pm 2$ SD | $\pm 2$ SD HENSSGE |
|-----------|---------------|-------|------------|--------------------|
| 1,0-0,5   | 2621 (43,7 h) | -0,35 | 2,62       | 2,8                |
| 0,5-0,3   | 1488 (24,8 h) | 0,94  | 1,16       | 3,2                |
| 0,3-0,2   | 252 (4,2 h)   | 1,28  | 1,3        | 4,5                |
| 1,0-0,2   | 4361 (72,6 h) | 0,19  | 2,52       | -                  |

Tabelle 3.9: Kühlminuten und statistische Maßzahlen für die mittelschweren Kühldummies.

| Q-Bereich | Kühlzeit        | $\mu$ | $\pm 2$ SD | $\pm 2$ SD HENSSGE |
|-----------|-----------------|-------|------------|--------------------|
| 1,0-0,5   | 6724 (112,1 h)  | -0,98 | 3,08       | 2,8                |
| 0,5-0,3   | 3148 (52,5 h)   | -0,1  | 6,08       | 3,2                |
| 0,3-0,2   | 1426 (23,8 h)   | -0,48 | 7,5        | 4,5                |
| 1,0-0,2   | 11299 (188,3 h) | -0,67 | 4,86       | -                  |

Tabelle 3.10: Kühlminuten und statistische Maßzahlen für alle Dummies bei warmer  $T_{(a)}$  im Bereich  $>23$  °C.  $\mu$  = Erwartungswert

| Q-Bereich | Kühlzeit          | $\mu$ | $\pm 2$ SD | $\pm 2$ SD HENSSGE |
|-----------|-------------------|-------|------------|--------------------|
| 1,0-0,5   | 62661 (1044,4h)   | -0,6  | 4,96       | 2,8                |
| 0,5-0,3   | 29669 (494,5h)    | 0,02  | 6,8        | 3,2                |
| 0,3-0,2   | 14765 (246,1h)    | -0,21 | 8,9        | 4,5                |
| 1,0-0,2   | 107119 (1785,3 h) | -0,37 | 6,2        | -                  |

Tabelle 3.11: Kühlminuten und statistische Maßzahlen für alle Dummies bei positiver  $T_{(a)}$ .  $\mu$  = Erwartungswert

| Q-Bereich | Kühlzeit        | $\mu$ | $\pm 2$ SD | $\pm 2$ SD HENSSGE |
|-----------|-----------------|-------|------------|--------------------|
| 1,0-0,5   | 10837 (180,6 h) | -0,19 | 2,82       | 2,8                |
| 0,5-0,3   | 5479 (91,3 h)   | 1,21  | 2,78       | 3,2                |
| 0,3-0,2   | 1503 (25,1 h)   | 2,25  | 3,64       | 4,5                |
| 1,0-0,2   | 17819 (297,0 h) | 0,44  | 3,34       | -                  |

Tabelle 3.12: Kühlminuten und statistische Maßzahlen für alle Dummies bei niedrig-positiver  $T_{(a)}$ .  $\mu$  = Erwartungswert

| Q-Bereich | Kühlzeit        | $\mu$ | $\pm 2$ SD | $\pm 2$ SD HENSSTGE |
|-----------|-----------------|-------|------------|---------------------|
| 1,0-0,5   | 6081 (104,1 h)  | 0,19  | 5,2        | 2,8                 |
| 0,5-0,3   | 2939 (48,9 h)   | -1,4  | 5,04       | 3,2                 |
| 0,3-0,2   | 1097 (18,3 h)   | -5,44 | 7,7        | 4,5                 |
| 1,0-0,2   | 10117 (168,6 h) | -0,89 | 6,48       | -                   |

Tabelle 3.13: Kühlminuten und statistische Maßzahlen für alle Dummies bei negativer  $T_{(a)}$ .  $\mu$  = Erwartungswert

| Q-Bereich | Kühlzeit        | $\mu$ | $\pm 2$ SD | $\pm 2$ SD HENSSTGE |
|-----------|-----------------|-------|------------|---------------------|
| 1,0-0,5   | 27008 (450,1 h) | -0,89 | 3,22       | 2,8                 |
| 0,5-0,3   | 14639 (244,0 h) | 0,16  | 5,02       | 3,2                 |
| 0,3-0,2   | 7465 (124,4 h)  | -0,26 | 6,26       | 4,5                 |
| 1,0-0,2   | 49120 (816,7 h) | -0,48 | 4,48       | -                   |

Tabelle 3.14: Kühlminuten und statistische Maßzahlen für verschiedene Kühlbereiche für erhöhte  $T_{(r@D)}$ .  $\mu$  = Erwartungswert

| Q-Bereich | Kühlzeit       | $\mu$ | $\pm 2$ SD | $\pm 2$ SD HENSSTGE |
|-----------|----------------|-------|------------|---------------------|
| 1,0-0,5   | 5544 (92,4 h)  | -0,01 | 2,32       | 2,8                 |
| 0,5-0,3   | 3198 (53,3 h)  | 0,75  | 1,7        | 3,2                 |
| 0,3-0,2   | 1053 (17,55 h) | -0,02 | 3,9        | 4,5                 |
| 1,0-0,2   | 9795 (163,3 h) | -0,93 | 1,74       | -                   |

Tabelle 3.15: Kühlminuten und statistische Maßzahlen für normale  $T_{(r@D)}$  in verschiedenen Kühlbereichen.  $\mu$  = Erwartungswert.

| Q-Bereich | Kühlzeit        | $\mu$ | $\pm 2$ SD | $\pm 2$ SD HENSSTGE |
|-----------|-----------------|-------|------------|---------------------|
| 1,0-0,5   | 21239 (354,0 h) | -0,27 | 3,14       | 2,8                 |
| 0,5-0,3   | 11608 (193,5 h) | 0,5   | 5,2        | 4,5                 |
| 0,3-0,2   | 4025 (67,1 h)   | 0,45  | 6,7        | 7,0                 |
| 1,0-0,2   | 36879 (614,7 h) | 0,05  | 4,44       | -                   |

Tabelle 3.16: Kühlminuten und statistische Maßzahlen für verschiedene Kühlbereiche für alle Kühldummies bei  $CF < 1$ .  $\mu$  = Erwartungswert

| Q-Bereich | Kühlzeit        | $\mu$ | $\pm 2$ SD | $\pm 2$ SD HENSSGE |
|-----------|-----------------|-------|------------|--------------------|
| 1,0-0,5   | 19190 (319,8 h) | -0,3  | 4,72       | 2,8                |
| 0,5-0,3   | 6751 (112,5 h)  | 0,71  | 6,32       | 4,5                |
| 0,3-0,2   | 3070 (51,2 h)   | -0,26 | 9,24       | 7,0                |
| 1,0-0,2   | 29012 (483,5 h) | -0,06 | 5,82       | -                  |

Tabelle 3.17: Kühlminuten und statistische Maßzahlen für verschiedene Kühlbereiche für alle Kühldummies  $CF > 1$ .  $\mu$  = Erwartungswert

| $T_{(r@D)}$ | Q-Bereich | Kühlzeit        |
|-------------|-----------|-----------------|
| 37,2 °C     | 1,0 - 0,2 | 20655 (344,3 h) |
| 37,2 °C     | 1,0 - 0,5 | 10253 (170,9 h) |
| 37,2 °C     | 0,5 - 0,3 | 5978 (99,6 h)   |
| 37,2 °C     | 0,3 - 0,2 | 2253 (37,6 h)   |
| 38,0 °C     | 1,0 - 0,2 | 18488 (308,2 h) |
| 38,0 °C     | 1,0 - 0,5 | 10253 (170,9 h) |
| 38,0 °C     | 0,5 - 0,3 | 6557 (111,0 h)  |
| 38,0 °C     | 0,3 - 0,2 | 3841 (64,0 h)   |

Tabelle 3.18: Veränderung der von Q-abhängigen Intervalle bei den Schweinen bei Verwendung des „ignorant-Berechnungsansatzes“ (grau hinterlegte Zeilen) und des „educated-Berechnungsansatzes“ (weiß hinterlegte Zeilen).

| $T_{(r@D)}$ | Ansatz | Q-Bereich | $\mu$  | 2 SD   |
|-------------|--------|-----------|--------|--------|
| 37,2 °C     | ig.    | 1,0 - 0,2 | 3,49 h | 8,02 h |
| 37,2 °C     | ig.    | 1,0 - 0,5 | 1,73 h | 5,78 h |
| 37,2 °C     | ig.    | 0,5 - 0,3 | 1,6 h  | 4,62 h |
| 37,2 °C     | ig.    | 0,3 - 0,2 | 6,18 h | 9,48 h |
| 38,0 °C     | ed.    | 1,0 - 0,2 | 1,24 h | 5,46 h |
| 38,0 °C     | ed.    | 1,0 - 0,5 | 1,17 h | 3,38 h |
| 38,0 °C     | ed.    | 0,5 - 0,3 | 1,24 h | 4,36 h |
| 38,0 °C     | ed.    | 0,3 - 0,2 | 1,39 h | 9,48 h |

Tabelle 3.19: Statistische Benchmarks für die Berechnungsansätze „educated“ oder „ignorant“) bei Schweinen.  $\mu$  = Erwartungswert.



Teil IV

DISKUSSION



## DISKUSSION

In Bezug nehmend auf die zu Beginn formulierten Fragestellungen kann gesagt werden, dass die Bruteforcing-Methode bei allen durchgeführten Experimenten am Kühldummy und Schwein eine Todeszeitschätzung ermöglichte. Auch in den Experimenten, die unter Verwendung von Korrekturfaktoren durchgeführt worden, war eine Todeszeitschätzung mittels Bruteforcing-Methode möglich. Die Anwendung von Korrekturfaktoren (CF) führte hierbei zu einer Veränderung des Kühlgewichts, was in der entsprechenden cooling-weight-curve (CWC) dargestellt werden konnte. In der vereinfachten Tabelle nach HENSSGE können die Korrekturfaktoren einen minimalen Wert von 0,6 bei Lage in Fließgewässern und maximal einen Wert von 2,5 bei Bedeckung mit drei schweren Bettdecken annehmen. Innerhalb der Bruteforcing-Methode konnte auf die Verwendung der in der Tabelle der Korrekturfaktoren sowie auch der korrigierten Korrekturfaktoren abgebildeten Werte für die entsprechenden Korrekturfaktoren (CF) verzichtet werden. [18] Auch für Abkühlbedingungen, für welche von HENSSGE keine Korrekturfaktoren postuliert wurden (z.B. teilweise Bedeckung mit einer feuchten, und im Verlauf abgetrockneten Lage Op-Kleidung), konnte innerhalb der Bruteforcing-Methode das entsprechende Kühlgewicht angepasst werden (z.B. teilweise Bedeckung mit einer feuchten, und im Verlauf abgetrockneten Lage Op-Kleidung).

Zuvor war bereits durch ALTHAUS versucht worden die Tabelle an Korrekturfaktoren zu erweitern. [5]. Ähnliche Versuche einer Erweiterung der CF-Tabelle sind entweder fehlgeschlagen oder aufgrund ihrer Komplexität nicht mehr durchgeführt worden. Bis zur Etablierung der Bruteforcing-Methode konnten oben beschriebene Szenarien (Kombination von mehreren Korrekturfaktoren, durchnässte, stark isolierende Bekleidung) daher nicht abgebildet werden.

Bereits in der Methodenentwicklung nach der Publikation durch HENSSGE ist auf das Skalierungsproblem bei Korrekturfaktoren eingegangen worden. Der gleiche Korrekturfaktor (z. B. eine Bedeckung mit einer Bettdecke) weist bei unterschiedlichen Körpermassen bzw. Körperproportionen einen unterschiedlichen Effekt auf. Eine Bettdecke hat hierbei einen stärkeren kühlungsmindernden Effekt auf den Leichnam eines Säuglings, als auf den Leichnam eines adipösen Mannes. Die in [18] zur Skalierung der Korrekturfaktoren (CF) formulierte Formel wurde zur Berechnung der entsprechenden korrigierten

Korrekturfaktoren (cCF) abhängig vom Realgewicht genutzt und die entsprechenden Ergebnisse zur vereinfachten Nutzung am Fundort in einer Tabelle aufgetragen. Besonders auffällig ist das Skalierungsproblem bei Säuglingen und Kindern, die andere Körperproportionen als Erwachsene aufweisen, und das Körpergewicht daher nicht entsprechend zu verwenden ist.

Selbst HENSSGE diskutierte bereits bei der Etablierung seiner Methode, dass eine Umsetzung der Nomogramm-Methode ohne das Konzept der Korrekturfaktoren zu einer Reduktion der subjektiven Einflüsse auf die Todeszeitschätzung beitragen würde. [30]. Auch wenn innerhalb der Bruteforcing-Methode keine Säuglinge bzw. Kinder untersucht wurden, war eine Todeszeitschätzung bei 17 Schweinen (kurze Gliedmaßen, massiver Rumpf und Kopf) möglich. Auch diese entsprachen dabei in ihren Proportionen nicht denen eines erwachsenen Menschen (kleiner Kopf auf einem mäßig ausgeprägten Rumpf mit langen Gliedmaßen).

Bei der Definition der Standardabkühlung (wo ein Korrekturfaktor von 1,0 (keine Anpassung des Kühlgewichts) zur Anwendung kommt), geht die NM-Methode von einem thermisch indifferenten Untergrund aus. Hierbei ermöglichen die vorgeschlagenen Korrekturfaktoren nur eine eingeschränkte Anpassung an thermisch nicht indifferente Untergründe. HENSSGE schlug bei stark isolierenden Materialien (wie einer dicken Matratze) vor, dass zusätzlich ein pauschaler Korrekturfaktor von +0,5 bis +1,0 zu dem bereits bestimmten Wert für den vorliegenden Korrekturfaktor hinzuzufügen ist. Auch innerhalb der Bruteforcing-Methode wurde die Auswirkung unterschiedlicher Untergründe auf das Kühlverhalten der Kühldummies und Schweine nicht untersucht, und konnte die entsprechenden Kühlszenarien daher nicht abbilden. In den späteren Schriften von HENSSGE wurde die Verwendung dieses pauschalen Korrekturfaktors jedoch auch nicht mehr empfohlen. [21]

Die Umgebungstemperatur ( $T_{(a)}$ ) und Rektaltemperatur zum Todeszeitpunkt ( $T_{(r@D)}$ ) sind in der praktischen Anwendung nicht immer bekannt und gegebenenfalls schwierig zu verifizieren. Fehlanahmen der  $T_{(a)}$  und  $T_{(r@D)}$  konnten durch die Bruteforcing-Methode mittels Analyse der cooling-weight-curve (CWC) in allen Experimenten detektiert werden. In der Methode nach HENSSGE mittels Nomogramm besteht eine solche Möglichkeit zur Feststellung und später auch Korrektur der Fehlanahmen dieser Parameter nicht.  $T_{(r@D)}$  wird hierbei innerhalb des Nomogramms standardisiert mit 37,2 °C angenommen. Eine Abbildung von Fieber bzw. einer erhöhten Temperatur zum Todeszeitpunkt ist daher innerhalb der Formel nach HENSSGE nicht möglich. Somit kann für viele in der Rechtsmedizin

untersuchten Fälle die Todeszeit nur mit einer Fehlannahme eines Parameters und damit einem verfälschten Wert geschätzt werden. Aus der Möglichkeit der Detektion einer „zu hohen“ bzw. „zu niedrigen“ Umgebungstemperatur ergibt sich auch die Möglichkeit einer Korrektur dieser Fehlannahmen.

Es existieren zwei Versionen des Nomogramms für unterhalb und oberhalb von  $23,2\text{ °C}$  (siehe Formel nach HENSSGE 2.1). Die Experimente, die zur Etablierung der Nomogramme für unterhalb von  $23,2\text{ °C}$  durch HENSSGE durchgeführt worden, erfolgten bei einer minimalen Umgebungstemperatur ( $T_{(a)}$ ) von  $-5,0\text{ °C}$ . [21] Die Grundlagen zur Etablierung der Nomogramme für Umgebungstemperaturen oberhalb von  $23,2\text{ °C}$  bildeten hierbei die Experimentaldaten von DE SARAM, welche in dieser Art ethisch nicht mehr wiederholt werden können. [40] Hierbei variiert bei den von der Umgebungstemperatur abhängigen Nomogrammen der Wert des Faktors A. In den Experimenten zur Etablierung der Bruteforcing-Methode, die bei Umgebungstemperaturen jenseits der  $-5,0\text{ °C}$  (bis teilweise  $-15,0\text{ °C}$ ) durchgeführt worden, zeigte sich ein stark erhöhtes Kühlgewicht. Dieses lässt den Rückschluss zu, dass das Konzept des Faktors A bei stark negativen Werten (jenseits der  $-5,0\text{ °C}$ ) an seine Grenzen stößt. In den entsprechenden Experimenten innerhalb der Bruteforcing-Methode war hierbei jedoch an den Ergebnissen erkennbar, dass die Ergebnisse mit hoher Wahrscheinlichkeit nicht zu verwenden sind. Dies ist vor dem Hintergrund eines Strafverfahrens bei Kapitaldelikten entsprechend nicht als Misserfolg zu werten, da die Nomogramm-Methode bis heute keine Datengrundlage zur Berechnung von Kühlszenarien jenseits von  $-5,0\text{ °C}$  enthält und die Ergebnisse damit nur eingeschränkt zu verwenden sind.

In späteren Forschungsarbeiten sollte daher der Wert des Faktors A bei stark negativen Umgebungstemperaturen unterhalb von  $-5,0\text{ °C}$  variiert und entsprechend angepasst werden. Hierfür ist eine elektronische Umsetzung der benötigten Vielzahl an unterschiedlichen individuellen Nomogrammen zu empfehlen, analog zu z.B. der elektronischen Umsetzung der Formel nach HENSSGE auf der Internetseite in [35]. Innerhalb der Experimente zur Etablierung der Bruteforcing-Methode war eine elektronische Berechnung der Todeszeit ohne Anwendung des konventionellen Nomogramms hierbei auch mittels automatisiertem PYTHON-Skript möglich. [43, 44]

In der täglichen Fallarbeit stellen Veränderungen der  $T_{(a)}$  im Rahmen der tageszeitlichen Schwankung ein Problem dar. Es hat in diesem Rahmen Versuche gegeben die Nomogramm-Methode diesbezüglich durch Etablierung eines Verzögerungsfaktors in Formel 2.1 anzupassen. [8]

Aufgrund der schwierigen Umsetzung in der Nomogramm-Methode

wurde dieses Konzept eines Verzögerungsfaktors nicht fortgeführt. Die plötzliche Erniedrigung der  $T_{(a)}$  als Teil dieses Problems wurde z.B. durch ALTHAUS in [4] untersucht. Jedoch konnte auch innerhalb dieser Arbeit keine Lösung für dieses Problem innerhalb der Nomogramm-Methode etabliert werden.

Zwar war es der Bruteforcing-Methode auch in der rechtsmedizinischen Fallarbeit in [37] möglich die Fehlannahmen der Parameter  $T_{(a)}$  und  $T_{(r@D)}$  zu detektieren, aber eine Anpassung dieser war noch nicht zufriedenstellend möglich. Innerhalb von sogenannten broken-experiments war es möglich mittels der Bruteforcing-Methode Todeszeiten zu bestimmen. Hierbei beinhalteten die entsprechenden Experimente nur leichte Fluktuationen der Umgebungstemperatur von 1 bis 2 °C. Plötzliche Veränderungen der Umgebungstemperatur, wie z.B. Verbringung eines Leichnams innerhalb der Abkühlung von einem geheizten Raum in eine Kühltruhe bzw. einen Kühlraum, können wahrscheinlich auch mit der Bruteforcing-Methode noch nicht zufriedenstellend abgebildet werden.

Die graphische Umsetzung der Formel nach HENSSGE als Nomogramm war revolutionär, da sie eine Berechnung der Todeszeit am Leichenfundort in einer Zeit, in der es noch keine tragbaren Computer und Logger gab, überhaupt ermöglicht hat. Dies hat zur dieser Zeit dementsprechend auch den Erfolg der Normogramm-Methode und ihr Bestehen bis zum jetzigen Zeitpunkt begründet. Aus diesem Grund versuchte HENSSGE Abänderungen oder Neuerungen durch Variationen der bereits bestehenden Faktoren oder Integration neuer Faktoren (Verzögerungsfaktor, Etablierung neuer Korrekturfaktoren) innerhalb des Nomogramms abzubilden. Jedoch stößt ein solches Verfahren naturgemäß mit Zunahme der Komplexität und Anpassungsmöglichkeiten an reale Tatortbedingungen an seine Grenzen. Diese Grenzen können wie durch die vorgestellte Bruteforcing-Methode erheblich verschoben werden.

Der Ausblick auf die Zukunft der Bruteforcing-Methode fußt hierbei vor allem auf der Fortsetzung der elektronischen Berechnung und der Erweiterung von Parametern für verschiedene Umgebungstemperaturen (z.B. Anpassung des Faktors  $A$  für negative  $T_{(a)}$ ). Auch sollte im Verlauf die Todeszeitschätzung mittels der Bruteforcing-Methode auf die Tatortarbeit und entsprechend Anpassung des experimentellen Setups an die Arbeit an Leichen angepasst werden. Besonders Knopffthermometer [25] könnten hierbei eine größere Mobilität der Messeinheit für die Experimente ermöglichen. Somit könnten auch weitere reale Umgebungsbedingungen (z.B. Auffinden im Fluss oder auf herabgefallenen Blättern als isolierende Unterlage) problemlos mobil an den Kühldummies und später auch an echten Leichen un-

tersucht werden. Bereits innerhalb der Experimente am Kühldummy und Schwein hatte sich das Sammeln von Kühlzeiten über portable Messtationen als praktikabel erwiesen. Es ist somit für die Zukunft davon auszugehen, dass die Sammlung von größeren Datenmengen an Leichen zu einem weiteren Fortschritt innerhalb der Bruteforcing-Methode führen wird.



Teil V

APPENDIX



## LITERATURVERZEICHNIS

---

- [1] Memmert GmbH + Co. KG. "Memmert IN 260 Datasheet". In: ().
- [2] Louay M Al-Alousi. "A study of the shape of the post-mortem cooling curve in 117 forensic cases". In: *Forensic Sci. Int.* 125 (2002), S. 237–244. ISSN: 0379-0738.
- [3] Louay M Al-Alousi, Robert A Anderson, Diana M Worster und David V Land. "Factors influencing the precision of estimating the postmortem interval using the triple-exponential formulae (TEF) Part I. A study of the effect of body variables and covering of the torso on the postmortem brain, liver and rectal cooling rates in 117 forensic cases". In: *Forensic Sci. Int.* 125 (2002), S. 223–230. ISSN: 0379-0738.
- [4] L Althaus und C Henssge. "Rectal temperature time of death nomogram: sudden change of ambient temperature". In: *Forensic Sci. Int.* 99.3 (Jan. 1999), S. 171–178. ISSN: 0379-0738. URL: <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/10098255>.
- [5] L Althaus, S Stückradt, C Henssge und T Bajanowski. "Cooling experiments using dummies covered by leaves". In: *Int. J. Legal Med.* 121.2 (März 2007), S. 112–114. ISSN: 0937-9827. DOI: [10.1007/s00414-006-0108-8](https://doi.org/10.1007/s00414-006-0108-8). URL: <http://dx.doi.org/10.1007/s00414-006-0108-8>.
- [6] *BEGO website*. <https://shop.bego.com/en/product/194>. Accessed: 2021-6-23.
- [7] Florian M Biermann und Stefan Potente. "The deployment of conditional probability distributions for death time estimation". In: *Forensic Sci. Int.* 210.1-3 (Juli 2011), S. 82–86. ISSN: 0379-0738, 1872-6283. DOI: [10.1016/j.forsciint.2011.02.007](https://doi.org/10.1016/j.forsciint.2011.02.007). URL: <http://dx.doi.org/10.1016/j.forsciint.2011.02.007>.
- [8] Paolo Bisegna, Claus Henssge, Lars Althaus und Giusto Giusti. "Estimation of the time since death: sudden increase of ambient temperature". In: *Forensic Sci. Int.* 176.2-3 (Apr. 2008), S. 196–199. ISSN: 0379-0738, 1872-6283. DOI: [10.1016/j.forsciint.2007.09.007](https://doi.org/10.1016/j.forsciint.2007.09.007). URL: <http://dx.doi.org/10.1016/j.forsciint.2007.09.007>.
- [9] Marcel Bovenschen, Holger Schwender, Stefanie Ritz-Timme, Kerim Beseoglu und Benno Hartung. "Estimation of time since death after a post-mortem change in ambient temperature: Evaluation of a back-calculation approach". In: *Forensic Sci. Int.* 319 (Feb. 2021), S. 110656. ISSN: 0379-0738, 1872-6283. DOI:

- 10.1016/j.forsciint.2020.110656. URL: <http://dx.doi.org/10.1016/j.forsciint.2020.110656>.
- [10] C. Henssge · L. Althaus · J. Bolt · A. Freisleder · H.-T. Haffner · C. A. Henssge · B. Hoppe · V. Schneider. “Experiences with a compound method for estimating the time since death. I. Rectal temperature nomogram for time since death”. In: *Int. J. Legal Med.* 113 (2000), S. 303–319. ISSN: 0937-9827.
- [11] C. Henssge · L. Althaus · J. Bolt · A. Freisleder · H.-T. Haffner · C. A. Henssge · B. Hoppe · V. Schneider. “Experiences with a compound method for estimating the time since death II. Integration of non-temperature-based methods”. In: *Int. J. Legal Med.* 113 (2000), S. 320–331. ISSN: 0937-9827.
- [12] Chiara Crostack, Susanne Sehner, Tobias Raupach und Sven Anders. “Re-establishment of rigor mortis: evidence for a considerably longer post-mortem time span”. en. In: *Int. J. Legal Med.* (Feb. 2017). ISSN: 0937-9827, 1437-1596. DOI: 10.1007/s00414-017-1558-x. URL: <http://dx.doi.org/10.1007/s00414-017-1558-x>.
- [13] EHRET Trocken-/Sterilisierschraenke - Ehret Solutions. de. <https://www.ehret-solutions.de/trocken-sterilisierschraenke/>. Accessed: 2021-7-19. Sep. 2018. URL: <https://www.ehret-solutions.de/trocken-sterilisierschraenke/>.
- [14] F Fiddes. “A percentage method for representing the fall in body temperature after death”. In: *J. Forensic Med.* 5 (1958), S. 2–15. ISSN: 0022-1171. URL: <https://ci.nii.ac.jp/naid/10012201405/>.
- [15] Luise Fleischer, Susanne Sehner, Axel Gehl, Martin Riemer, Tobias Raupach und Sven Anders. “Measurement of Postmortem Pupil Size: A New Method with Excellent Reliability and Its Application to Pupil Changes in the Early Postmortem Period”. en. In: *J. Forensic Sci.* 62.3 (Mai 2017), S. 791–795. ISSN: 0022-1198, 1556-4029. DOI: 10.1111/1556-4029.13318. URL: <http://dx.doi.org/10.1111/1556-4029.13318>.
- [16] Raspberry Pi Foundation. “Raspberry-Pi-Model-B plus Datasheet”. In: (). URL: <https://static.raspberrypi.org/files/product-briefs/Raspberry-Pi-Model-Bplus-Product-Brief.pdf>.
- [17] M A Green und J C Wright. “Postmortem interval estimation from body temperature data only”. In: *Forensic Sci. Int.* 28.1 (Mai 1985), S. 35–46. ISSN: 0379-0738. URL: <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/4018680>.

- [18] C Henssge. "Rectal temperature time of death nomogram: dependence of corrective factors on the body weight under stronger thermic insulation conditions". In: *Forensic Sci. Int.* 54.1 (Apr. 1992), S. 51–66. ISSN: 0379-0738. URL: <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/1618454>.
- [19] C Henssge, L Althaus, J Bolt, A Freislederer, H T Haffner, C A Henssge, B Hoppe und V Schneider. "Experiences with a compound method for estimating the time since death. I. Rectal temperature nomogram for time since death". en. In: *Int. J. Legal Med.* 113.6 (2000), S. 303–319. ISSN: 0937-9827. URL: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/11100425>.
- [20] C Henssge, L Althaus, J Bolt, A Freislederer, H T Haffner, C A Henssge, B Hoppe und V Schneider. "Experiences with a compound method for estimating the time since death. II. Integration of non-temperature-based methods". en. In: *Int. J. Legal Med.* 113.6 (2000), S. 320–331. ISSN: 0937-9827. URL: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/11100426>.
- [21] C Henssge und B Madea. *Methoden zur Bestimmung der Todeszeit an Leichen*. Arbeitsmethoden der medizinischen und naturwissenschaftlichen Kriminalistik. M. Schmidt-Römhild, 1988. ISBN: 9783795006242. URL: <https://books.google.de/books?id=Ta0hAQAAMAAJ>.
- [22] C Henssge und B Madea. "Estimation of the time since death". In: *Forensic Sci. Int.* 165.2-3 (Jan. 2007), S. 182–184. ISSN: 0379-0738. DOI: 10.1016/j.forsciint.2006.05.017. URL: <http://dx.doi.org/10.1016/j.forsciint.2006.05.017>.
- [23] Michael Hubig, Holger Muggenthaler und Gita Mall. "Conditional probability distribution (CPD) method in temperature based death time estimation: Error propagation analysis". In: *Forensic Sci. Int.* 238 (Mai 2014), S. 53–58. ISSN: 0379-0738, 1872-6283. DOI: 10.1016/j.forsciint.2014.02.016. URL: <http://dx.doi.org/10.1016/j.forsciint.2014.02.016>.
- [24] Michael Hubig, Holger Muggenthaler, Inga Sinicina und Gita Mall. "Body mass and corrective factor: impact on temperature-based death time estimation". In: *Int. J. Legal Med.* 125.3 (Mai 2011), S. 437–444. ISSN: 0937-9827, 1437-1596. DOI: 10.1007/s00414-011-0551-z. URL: <http://dx.doi.org/10.1007/s00414-011-0551-z>.
- [25] Maxim Integrated. "DS18B20 Programmable Resolution 1-Wire Digital Thermometer Datasheet". In: (). URL: <https://datasheets.maximintegrated.com/en/ds/DS18B20.pdf>.
- [26] Michał Kaliszan. "First practical applications of eye temperature measurements for estimation of the time of death in caesework. Report of three cases". In: *Forensic Sci. Int.* 219.1-3 (Ju-

- ni 2012), e13–5. ISSN: 0379-0738, 1872-6283. DOI: [10.1016/j.forsciint.2011.11.027](https://doi.org/10.1016/j.forsciint.2011.11.027). URL: <http://dx.doi.org/10.1016/j.forsciint.2011.11.027>.
- [27] Yoshimasa Kanawaku, Jun Kanetake, Atsuki Komiya, Shigenao Maruyama und Masato Funayama. “Computer simulation for postmortem cooling processes in the outer ear”. In: *Leg. Med.* 9.2 (März 2007), S. 55–62. ISSN: 1344-6223. DOI: [10.1016/j.legalmed.2006.09.006](https://doi.org/10.1016/j.legalmed.2006.09.006). URL: <http://dx.doi.org/10.1016/j.legalmed.2006.09.006>.
- [28] Yoshimasa Kanawaku, Jun Kanetake, Atsuki Komiya, Shigenao Maruyama und Masato Funayama. “Effects of rounding errors on postmortem temperature measurements caused by thermometer resolution”. In: *Int. J. Legal Med.* 121.4 (Juli 2007), S. 267–273. ISSN: 0937-9827. DOI: [10.1007/s00414-006-0088-8](https://doi.org/10.1007/s00414-006-0088-8). URL: <http://dx.doi.org/10.1007/s00414-006-0088-8>.
- [29] B. Knight und K. Simpson. *Simpson’s Forensic Medicine, 11Ed.* Taylor & Francis, 1996. ISBN: 9780340613702. URL: <https://books.google.de/books?id=M26bQgAACAAJ>.
- [30] Burkhard Madea. *Estimation of the Time Since Death, Third Edition.* CRC Press, Sep. 2015. ISBN: 9781444181777. URL: [http://books.google.de/books/about/Estimation\\_of\\_the\\_Time\\_Since\\_Death\\_Third.html?hl=&id=WNKYCgAAQBAJ](http://books.google.de/books/about/Estimation_of_the_Time_Since_Death_Third.html?hl=&id=WNKYCgAAQBAJ).
- [31] Burkhard Madea. “Methods for determining time of death”. en. In: *Forensic Sci. Med. Pathol.* 12.4 (Dez. 2016), S. 451–485. ISSN: 1547-769X, 1556-2891. DOI: [10.1007/s12024-016-9776-y](https://doi.org/10.1007/s12024-016-9776-y). URL: <http://dx.doi.org/10.1007/s12024-016-9776-y>.
- [32] K Meeh. “Oberflächenmessungen des menschlichen Körpers”. In: *Z.Biol.* 15 (1897), S. 425–458.
- [33] H Muggenthaler, M Hubig, S Schenkl, S Niederegger und G Mall. “Calibration and parameter variation using a finite element model for death time estimation: The influence of the substrate”. en. In: *Leg. Med.* 25 (März 2017), S. 23–28. ISSN: 1344-6223, 1873-4162. DOI: [10.1016/j.legalmed.2016.12.007](https://doi.org/10.1016/j.legalmed.2016.12.007). URL: <http://dx.doi.org/10.1016/j.legalmed.2016.12.007>.
- [34] E L Nelson. “ Estimation of short-term postmortem interval utilizing core body temperature: a new algorithm”. In: *Forensic Sci. Int.* 109.1 (März 2000), S. 31–38. ISSN: 0379-0738. URL: <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/10759069>.
- [35] “[PDF]Estimation of the time since death in the early post-mortem ... - swisswuff”. In: (). URL: <http://www.swisswuff.ch/wordpress/wp-content/uploads/2011/10/0329-Henssge-Estimationofthetimesincedeath.pdf>.

- [36] S Potente, M Kettner und T Ishikawa. "Time since death nomographs implementing the nomogram, body weight adjusted correction factors, metric and imperial measurements". en. In: *Int. J. Legal Med.* 133.2 (Sep. 2018), S. 491–499. ISSN: 0937-9827, 1437-1596. DOI: [10.1007/s00414-018-1928-z](https://doi.org/10.1007/s00414-018-1928-z). URL: <http://dx.doi.org/10.1007/s00414-018-1928-z>.
- [37] Stefan Potente, Victoria Hanser, Sara Heinbuch, Arne Wrede, Nadine Schäfer und Peter Schmidt. "Hypothermic sepsis in time since death estimation – a case report". In: *Int. J. Legal Med.* (Feb. 2024). ISSN: 0937-9827, 1437-1596. DOI: [10.1007/s00414-024-03193-4](https://doi.org/10.1007/s00414-024-03193-4). URL: <https://doi.org/10.1007/s00414-024-03193-4>.
- [38] Keith W Proctor, William J Kelch und John C New. "Estimating the time of death in domestic canines". In: *J. Forensic Sci.* 54.6 (Nov. 2009), S. 1433–1437. ISSN: 0022-1198, 1556-4029. DOI: [10.1111/j.1556-4029.2009.01156.x](http://dx.doi.org/10.1111/j.1556-4029.2009.01156.x). URL: <http://dx.doi.org/10.1111/j.1556-4029.2009.01156.x>.
- [39] M Rubner. "Über den Einfluss der Körpergrösse auf Stoff- und Kraftwechsel". In: *Z.Biol.* 19 (1883), S. 536–562.
- [40] G S W de Saram, G Webster und N Kathirgamatamby. "Post-mortem temperature and the time of death". In: *J. Crim. L. Criminology & Police Sci.* 46.4 (1955), S. 562–577. ISSN: 0022-0205. DOI: [10.2307/1139735](http://scholarlycommons.law.northwestern.edu/cgi/viewcontent.cgi?article=4412&context=jclc). URL: <http://scholarlycommons.law.northwestern.edu/cgi/viewcontent.cgi?article=4412&context=jclc>.
- [41] Abraham Savitzky und M J E Golay. "Smoothing and Differentiation of Data by Simplified Least Squares Procedures". In: *Anal. Chem.* 36.8 (1964), S. 1627–1639. ISSN: 0003-2700. DOI: [10.1021/ac60214a047](http://dx.doi.org/10.1021/ac60214a047). eprint: <http://dx.doi.org/10.1021/ac60214a047>. URL: <http://dx.doi.org/10.1021/ac60214a047>.
- [42] W.U. Spitz und R.S. Fisher. *Spitz and Fisher's Medicolegal Investigation of Death: Guidelines for the Application of Pathology to Crime Investigation*. C.C. Thomas, 1993. ISBN: 9780398058180.
- [43] G Van Rossum und F L Drake Jr. *Python reference manual*. Centrum voor Wiskunde en Informatica Amsterdam, 1995.
- [44] G Van Rossum und F L. Drake. *Python 3 Reference Manual*. Scotts Valley, CA: CreateSpace, 2009. ISBN: 1441412697.
- [45] Sophie Warther, Susanne Sehner, Tobias Raupach, Klaus Püschel und Sven Anders. "Estimation of the time since death: post-mortem contractions of human skeletal muscles following mechanical stimulation (idiomuscular contraction)". In: *Int. J. Legal Med.* 126.3 (Mai 2012), S. 399–405. ISSN: 0937-9827, 1437-1596. DOI: [10.1007/s00414-011-0665-3](http://dx.doi.org/10.1007/s00414-011-0665-3). URL: <http://dx.doi.org/10.1007/s00414-011-0665-3>.



## EHRENWÖRTLICHE ERKLÄRUNG

---

*Ehrenwörtliche Erklärung zu meiner Dissertation mit dem Titel "Bruteforcing in der temperaturgestützten Todeszeitschätzung"*

Sehr geehrte Damen und Herren,

hiermit erkläre ich, dass ich die beigefügte Dissertation selbstständig verfasst und keine anderen als die angegebenen Hilfsmittel genutzt habe. Alle wörtlich oder inhaltlich übernommenen Stellen habe ich als solche gekennzeichnet.

Ich versichere außerdem, dass ich die beigefügte Dissertation nur in diesem und keinem anderen Promotionsverfahren eingereicht habe und, dass diesem Promotionsverfahren keine endgültig gescheiterten Promotionsverfahren vorausgegangen sind.

---

Loreen Henneicke